



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR
FACULTAD DE ELECTROTECNÍA Y COMPUTACIÓN

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE MONITOREO Y
MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA CARGA
CONECTADA A LA LÍNEA DE TENSIÓN SECUNDARIA MONOFÁSICA DE
UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA RESIDENCIAL”**

Autor:

Roosevelt José Lindo Vargas.

Tutor:

MSc. María Virginia Moncada Balmaceda.

Asesor:

Ing. Manuel Arcia Salmerón.

Mayo 2016

Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

A **Dios**, por su inmenso amor y bondad al concederme vida, paciencia, constancia y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida

A mis padres **Concepción Vargas** y **Camilo Lindo** por ser un ejemplo vivo del amor de Dios, porque además de ser grandes seres humanos han sido mejores progenitores, por ser mi inspiración de perseverar todos los días para cumplir mis metas.

A mis hermanos **María Camila, Silvio, Milagros** porque a través de su sencillez y humildad y amor han sido modelos a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente,

A **Dios** por estar cerca de mí y acompañarme no solo en este sino en todas las etapas de mi vida. Por amarme con ternura y regalarme una vida prospera y bendecida.

A mis padres **Concepción Vargas** y **Camilo Lindo** por su paciencia y comprensión durante mi vida, por sus consejos, los cuales me han permitido culminar todos los objetivos y metas planteados satisfactoriamente. Por su amor y dedicación a mí.

A mis hermanos **María Camila, Silvio, Milagros** por apoyarme incondicionalmente en esta etapa de mi vida.

A mis amigos de infancia y mis amigos de electrónica: **Cristian, Allan, Juan Ramón, Fernando, Gerardo etc.**, por motivarme siempre, por sus consejos y su ayuda tanto profesional como emocional.

A las familias **Castellón Narváez, Duriez Bustamante, Arguello Lindo** por su hospitalidad y generosidad, por tratarme como un miembro más de la familia.

A **Lourdes** por creer siempre en mí, por sus consejos y su amor

A los profesores **Leonardo Aguirre, Carlos Ortega, Manuel Arcia, Luis Orozco** por sus consejos y enseñanzas.

A mi asesor **Manuel Arcia** por transmitirme sin recelo todos sus conocimientos, por ser un ejemplo de persona y profesional, por el tiempo invertido en la culminación de este trabajo monográfico.

RESUMEN

Verificar el consumo de energía eléctrica en un país subdesarrollado como Nicaragua es relevante puesto que la mayor parte de la población es de clase media baja y requiere alcanzar el subsidio a la tarifa de energía (Ley de Variación de la Tarifa de energía eléctrica al consumidor)

Por tal razón se planteó diseñar e implementar un dispositivo que cumpliera con los requisitos de precisión para la medición del consumo individual de energía eléctrica (KWh) de los electrodomésticos en los hogares nicaragüenses.

El prototipo de medición de energía desarrollado en este trabajo monográfico tiene la capacidad de medir el consumo de las variables eléctricas de: voltaje, corriente, potencia activa, factor de potencia y energía activa para de esta manera llevar un mejor control del consumo de energía y así corroborar el funcionamiento correcto del medidor de energía impuesto por el distribuidor de energía eléctrica del país.

El prototipo medidor permite visualizar los datos a través de una pantalla de cristal líquido las variables medidas, muestra la fecha y la hora de la medición y almacena estos datos en una tarjeta de memoria SD Card. La información del dispositivo puede ser constatada a través de una hoja de cálculo usando cualquier aplicación con la peculiaridad de decodificar archivos en coma flotante (.csv). En este caso se utilizó Microsoft Excel donde se reflejan las variables medidas con su respectiva fecha y hora.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	10
II. OBJETIVOS	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
III. JUSTIFICACIÓN	12
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	12
3.2 DELIMITACIÓN DEL TEMA.....	13
IV. MARCO TEÓRICO	14
CAPÍTULO 1: BASES TEÓRICAS	14
MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	25
CAPÍTULO 2: PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE MONITOREO Y MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN CARGA CONECTADA A LA LÍNEA DE TENSIÓN SECUNDARIA MONOFÁSICA DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA RESIDENCIAL	29
2.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA. 29	
Control.....	37
Visualización	40
Sincronización	42
Almacenamiento.....	43
CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS DE DISEÑO	50
CAPÍTULO 4: DIAGRAMAS.....	52
4.1: DIAGRAMA EN BLOQUES DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA MONOFÁSICO.....	52
4.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE CÓDIGO DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA MONOFÁSICO	57
V EXPERIMENTOS Y RESULTADOS	59

CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA	59
Simulación y Código de Programación	59
VI. COSTO DEL PROTOTIPO DE MEDICIÓN Y MONITOREO DE ENERGÍA.....	94
VII CONCLUSIONES.....	96
VIII RECOMENDACIONES.....	98
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	99
X ANEXOS	103
10.1 DISEÑO DE LAS TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO	120
10.1.1 TARJETA DE LA FUENTE DE PODER Y EL CIRCUITO DE LA SEÑAL DE MAGNITUD DE TENSIÓN	120
10.1.2 TARJETA DEL SENSOR DE CORRIENTE Y LA SEÑAL DE MAGNITUD DE CORRIENTE.....	121
10.1.3 TARJETA DE LAS SEÑALES DE FASE DE TENSIÓN Y CORRIENTE ..	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación del sentido de la corriente eléctrica.....	15
Figura 2: Representación de la tensión eléctrica	16
Figura 3: Representación de la potencia eléctrica	17
Figura 4: Diagrama de cargas eléctricas.....	19
Figura 5: Sistema de suministro de energía eléctrica.....	22
Figura 6: Diagrama de distribución de energía eléctrica	23
Figura 7: Representación del consumo de energía eléctrica promedio	23
Figura 8: Ejemplo de un circuito eléctrico simple	24
Figura 9: Sistema monofásico	25
Figura 10: Diagrama de un medidor electromagnético.....	26
Figura 11: Medidor electromecánico con registrador electrónico	27
Figura 12: Medidor de energía Kill A Watt.....	28
Figura 13: Diagrama de una fuente de alimentación.....	30
Figura 14: Representación de un circuito para la obtención de la señal de voltaje.....	31
Figura 15: Modelo de un sensor Shunt con capacitancia parásita.....	32
Figura 16: Transformador de corriente	32
Figura 17: Bobina Rogowski	33
Figura 18: Principio del efecto Hall.....	35
Figura 19: Diagrama del sensor ACS712.....	36
Figura 20: Sensibilidad de los sensores de la familia ACS712	36
Figura 21: Microcontrolador PIC18F2525.....	39
Figura 22: Pantalla LCD DISPLATECH 204 SERIES	40
Figura 23: Reloj de tiempo real DS1307	43
Figura 24: Registro de errores enviado por la memoria	47
Figura 25: Compilador PIC C Compiler de CCS, Inc.....	50
Figura 26: Software Proteus de Labcenter Electronics	51
Figura 27: Configuración del transformador TRAN-2P3S.....	61
Figura 28: Circuito de regulación de voltaje	63

Figura 29: Circuito de indicación de fuente activa/inactiva	63
Figura 30: Señales de la fuente de alimentación	64
Figura 31 Divisor de voltaje que representa la magnitud de la señal de tensión	65
Figura 32: Representación de la señal de magnitud de voltaje en el ckto completo	66
Figura 33: Programación del canal de voltaje	66
Figura 34: Aplicación de voltaje de salida rectificado	67
Figura 35: Curva característica del sensor ACS712	67
Figura 36: Programación del sensor ACS712-20 A	69
Figura 37: Simulación del sensor ACS712-20 A	69
Figura 38: Circuito corrector-amplificador de corriente	70
Figura 39: Señales del circuito de corrección-amplificación de corriente.....	71
Figura 40: Representación de una señal senoidal	72
Figura 41: Onda cuadrada de la señal de fase del voltaje	74
Figura 42: Onda cuadrada de la señal de fase de la corriente	75
Figura 43: Generadores de pulso para las señales fase de corriente y voltaje	76
Figura 44: Configuración del módulo CCP del PIC (flanco de subida y flanco de bajada).....	78
Figura 45: Declaración del módulo CCP dentro de la función principal	79
Figura 46: Función para el cálculo del ancho de pulso (desfase entre V e I)	79
Figura 47: Cálculo de la potencia aparente S (Volt-Amperios VA)	80
Figura 48: Cálculo de la potencia activa P (Watt)	81
Figura 49: Cálculo de la energía activa	81
Figura 50: Entradas lógicas de las magnitudes de las señales de V e I en el PIC 18F2525	82
Figura 51: Entrada lógica del desfase entre las señales V e I en el PIC 18F2525	82
Figura 52: Modificación de la librería del LCD 20x4	83
Figura 53: Ajuste del timer a una interrupción cada segundo	85

Figura 54: Diagrama del RTC-DS1307	87
Figura 55: Conexión de la memoria MMC con PIC 18F2525	88
Figura 56: Conexión entre el PIC, la MMC y el DS1307	89
Figura 57: Memoria habilitada y operación de escritura.....	90
Figura 58: Declaración de variables para uso de la MMC	92
Figura 59: Datos almacenados en hoja de cálculo de Excel	93
Figura 60: Circuito completo de la fuente de voltaje.....	103
Figura 61: Errores de la simulación con muchos componentes analógicos.....	104
Figura 62: Señales del osciloscopio. Canal A y canal B	105
Figura 63: Circuito de fase de la señal de voltaje	106
Figura 64: Circuito de fase de la señal de corriente	107
Figura 65: Configuración de los propiedades de los generadores de pulso para las fases de las señales de corriente y voltaje	107
Figura 66: Ancho de pulso de las señal resultante entre la diferencia de fase de V e I.....	108
Figura 67: Conexión del LCD LM044L	109
Figura 68: Librería para la configuración de la fecha y el tiempo del DS1307	113
Figura 69: Diagrama paso a paso de la configuración de fecha y tiempo del DS1307	114
Figura 70: Código de programación de la tarjeta de memoria	116
Figura 71: Push Button de incremento de hora para energía activa	117
Figura 72: Interfaz del diseño del prototipo medidor de energía	119
Figura 73: Diseño de la Fuente de Voltaje y el Circuito de Magnitud de Tensión	120
Figura 74: Diseño de la tarjeta del sensor de corriente y la señal de magnitud de corriente.....	121
Figura 75: Tarjeta para las señales de fase de Voltaje y Corriente	122

I. INTRODUCCIÓN

El control del consumo de energía eléctrica de nuestros electrodomésticos es de suma importancia, nos permite hacer un uso racional de estos aparatos eléctrico-electrónicos, y a la vez contribuir positivamente al crecimiento económico del país, de forma sostenible [1].

Actualmente se están implementando sistemas electrónicos que permiten obtener lecturas individuales de cada aparato eléctrico-electrónico en uso. Aunque estos sistemas son costosos y de complejo diseño, permiten al usuario tener un mejor control en el consumo de energía eléctrica. [2].

El presente trabajo monográfico consiste en el diseño y construcción de un prototipo electrónico de bajo coste que mida y monitoree el consumo de energía eléctrica de un aparato eléctrico-electrónico que se conecte a una línea de tensión secundaria bifilar monofásica de una instalación eléctrica. El sistema está elaborado exclusivamente para uso residencial.

Este sistema de medición pretende contribuir al uso racional de la energía eléctrica permitiéndole al usuario tener un mejor control del consumo promedio de energía de sus dispositivos eléctricos al final de cada mes, ya que puede corroborar el gasto eléctrico del equipo durante el intervalo de tiempo deseado y de esta manera podrá comprender mejor el servicio de lectura y facturación de la empresa de distribución de energía eléctrica.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Medir el consumo de energía eléctrica de una carga en una línea secundaria monofásica de una instalación eléctrica residencial mediante la implementación de un prototipo electrónico que calcula y almacena cada intervalo de tiempo determinado la energía consumida.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar adecuadamente el sensor de corriente para el medidor de energía.
- Aplicar software de alto nivel ISIS PROTEUS para la simulación del comportamiento del prototipo de medición electrónico.
- Diseñar el sistema de control para el medidor de energía basado en un microcontrolador de la familia PIC.
- Desarrollar una interfaz hombre-máquina que admita la comunicación con el sistema de monitoreo de energía y permita el intercambio de datos con una PC.
- Implementar el prototipo de medición de bajo coste.

III. JUSTIFICACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El monitoreo del consumo de energía eléctrica en los hogares, permite tomar acciones de mejora por parte del usuario y de esta manera ajustar su consumo de acuerdo a sus prioridades y capacidades de pago. Además de favorecer a un estado consciente del uso de la energía y la importancia de su uso de forma racional. Por otra parte en, Nicaragua es permitido (de acuerdo a la Normativa del Servicio Eléctrico, apartado NSE 5.3.6, del Instituto Nicaragüense de Energía [3] que los usuarios utilicen aparatos de medición alterna para constatar el consumo de energía con diferentes propósitos, entre ellos se incluye el reclamo a la distribuidora del servicio eléctrico.

Por lo que contar con una herramienta para la medición de energía eléctrica, no es solo de gran importancia para los nicaragüenses, sino también avalado y permitido, para los usuarios interesados en el estudio de su consumo así como en la aplicación de medidas de ahorro energético.

El sistema de monitoreo y medición de energía eléctrica que se propone en este trabajo monográfico, tiene como objetivo primordial brindar una herramienta para la medición alternativa confiable, de bajo costo y alta precisión, que permita obtener datos precisos del consumo de energía eléctrica residencial. Los datos medidos son almacenados en formato digital y estarán disponibles para su transmisión o almacenamiento para futuros estudios.

Por otra parte el proceso de calibración y certificación del equipo a construir, de acuerdo al patrón de la Distribuidora, es un tema de relevancia y se aborda como parte de los objetivos específicos del proyecto de tesis.

3.2 DELIMITACIÓN DEL TEMA

Este sistema está elaborado únicamente para uso residencial, de tal manera que puede medir valores máximos y mínimos de voltaje y corriente para obtener el cálculo de potencia activa acumulada en una carga y por lo tanto de energía consumida. Esto se realiza en períodos de tiempo determinado por el usuario¹; conjuntamente se desarrolló una interfaz para la comunicación con la PC, característica que lo hace aún más interesante y útil.

¹ La medición de energía es continua (cada tantos minutos, segundos, horas, días). Esto podrá ser configurado dada la preferencia del usuario.

IV. MARCO TEÓRICO

Es fundamental definir algunos conceptos para comprender el funcionamiento del prototipo medidor y familiarizarnos con las variables del dispositivo electrónico.

CAPÍTULO 1: BASES TEÓRICAS

El término más básico es la carga eléctrica.

- **Carga Eléctrica** es una propiedad intrínseca de la materia que se produce mediante la interacción electromagnética (fuerzas de atracción y repulsión) de partículas subatómicas, es decir surgen de la correlación² entre electrones (cargas negativas) y protones (cargas positivas) a través de la mediación de campos electromagnéticos. Su unidad de medida es el Coulomb (Q).

Una carga equivale a $1 \text{ C} = \frac{1}{1.602 \cdot 10^{-19}} = 6.24 \cdot 10^{18}$ cargas elementales.

- **Corriente Eléctrica** es la tasa de flujo (transporte) de carga eléctrica que pasa por un determinado punto a través de un conductor en un circuito eléctrico.

El sentido real de la corriente es el desplazamiento desde el polo negativo al polo positivo de un circuito aunque el sentido convencional propone el movimiento de electrones del polo positivo al polo negativo. Se representa por la letra [I] y su unidad de medida es el Ampere (A).

² Según la RAE: Correspondencia o relación recíproca entre dos o más cosas o series de cosas.

Cuando una carga q se transforma a través de un conductor en un circuito eléctrico o alambre, en un tiempo t , entonces la intensidad de la corriente se define como

$$i = \frac{dq}{dt}$$

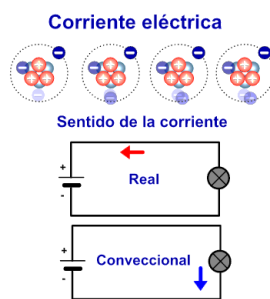


Figura 1: Representación del sentido de la corriente eléctrica

- **Tensión eléctrica**, llamado también voltaje, es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica sobre las cargas eléctricas en una diferencia de potencial, o bien entre dos posiciones determinadas para que se establezca el flujo de corriente [4]. Se representa por la letra $[V]$ y su unidad de medida es el Voltio (V).

El voltaje se expresa como la razón a la cual la energía potencial varía respecto a la carga

$$v = \frac{dw}{dq}$$



Figura 2: Representación de la tensión eléctrica

- **Potencia Eléctrica** se define como la cantidad de energía convertida en trabajo. Otras definiciones determinan que es la velocidad con la que se consume energía. La potencia se mide en Joule por segundo (J/seg)³ y se representa por **P**.

La potencia se denota por la rapidez de transferencia de energía con el respecto al tiempo.

$$p = \frac{dw}{dt}$$

- **Potencia Apparente** Llamada también potencia total, es la suma geométrica de las potencias activa y reactiva; es decir, resulta de la adición tanto de la energía disipada en forma de calor, como de la energía utilizada en forma de trabajo. Se representa por [**S**] y se mide en volt-amperios (VA).

Donde $S = V * I$

- **Potencia Activa** llamada también potencia promedio; es potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de energía eléctrica en trabajo. Es la potencia útil o sea, la

³ 1(J/seg)=1 watt

energía que realmente se aprovecha cuando ponemos a funcionar un equipo eléctrico y realiza un trabajo. Se designa por **[P]** y se mide en vatios. (W).

Donde $P = V * I * \cos \varphi$

- **Potencia Reactiva** es la potencia disipada por las cargas reactivas⁴. No es una potencia realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo [5]. Por ello, se dice que es una potencia devastada [6]. Se mide en volt-amperios reactivos (VAR) y se representa por **[Q]**.

Donde $Q = V * I * \sin \varphi$

Si graficamos el *Triángulo de Potencias* mediante un plano cartesiano, veremos que S sería la hipotenusa, ya que es la potencia total, mientras que P estaría en el cateto adyacente ya que la potencia real y por lo tanto Q se ubicaría en el cateto opuesto por ser una potencia que no produce útil.

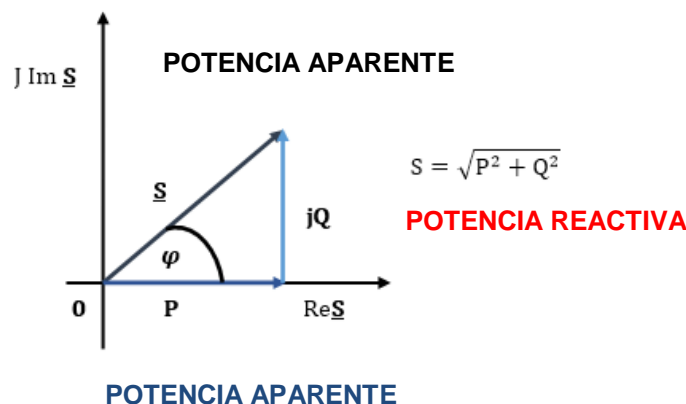


Figura 3: Representación de la potencia eléctrica

⁴ Pueden ser cargas inductivas o cargas capacitivas.

Como se podrá observar en el triángulo de la ilustración, el factor de potencia o coseno de “fi” ($\cos \varphi$) representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga o el consumidor conectado a un circuito eléctrico de corriente alterna [7]. De manera que el factor de potencia se puede definir como:

- **Factor de Potencia** Es el término que describe la cantidad de energía eléctrica convertida en trabajo. Es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía. Se define por [FP].

$$\text{Donde } FP = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{Potencia aparente}} = \frac{V \cdot I \cos \varphi}{V \cdot I} = \cos \varphi$$

El factor de potencia puede representarse mediante el gráfico 1, el cual indica mediante el cuadro de color rojo que si es ($0 < FP < 0.95$) la cantidad de trabajo no es muy provechosa, mientras que el cuadro de color amarillo ($0.95 < FP < 1$) muestra que ha sido realizado trabajo útil.

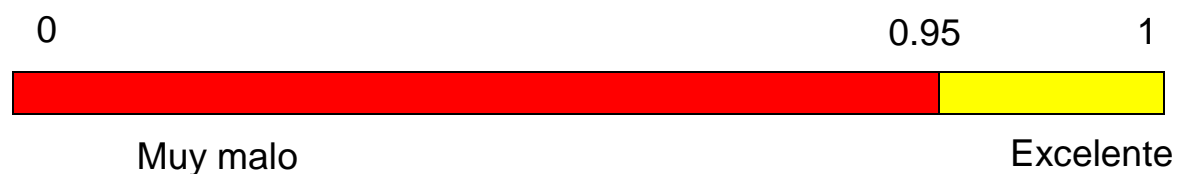


Gráfico 1: Indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica

En artefactos resistivos (plancha, lámparas incandescentes, estufas) el factor de potencia toma valores de aproximadamente 1 (100% energía activa). En otros artefactos donde una parte de energía se transforma en energía mecánica, luz o movimiento (energía activa) y la parte restante requiere otro tipo de energía,

aparatos tales como (aires acondicionados, motores), forman parte de energía reactiva; en estos casos la el factor de potencia toma valores menores a 1 [8].

- Para cargas resistivas: la corriente y el voltaje están en fase, se dice que la energía es activa. (1)
- Cuando están presentes cargas inductivas: El voltaje adelanta a la corriente, creando un desfase de aproximadamente 90° , por lo tanto la energía es reactiva. (2)
- En cargas capacitivas la corriente adelanta al voltaje aproximadamente 90° , la energía es reactiva. (3)

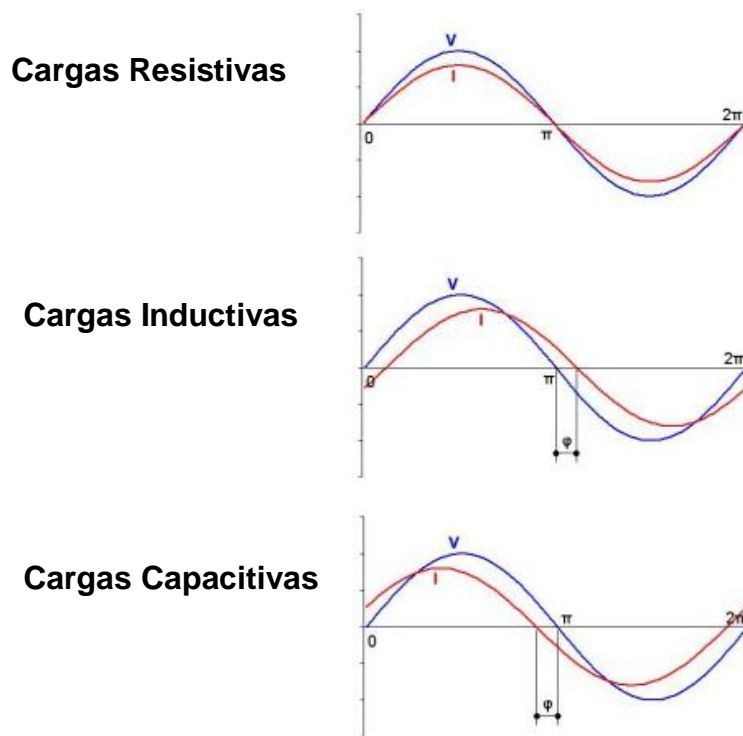


Figura 4: Diagrama de cargas eléctricas

- **Energía Eléctrica** Es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos -cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico- y de esta manera obtener trabajo.

La energía eléctrica se produce por el movimiento de cargas eléctricas, específicamente electrones (cargas negativas que giran alrededor del núcleo de los átomos) a través de un cable conductor [9]. Su unidad de medida es kWh (kilovatios por hora).

La energía eléctrica se describe como la potencia consumida por un aparato eléctrico en un intervalo de tiempo.

$$E = P * \Delta t$$

Para que la energía eléctrica alimente nuestros hogares atraviesa diversos procesos. A esta actividad se le conoce con el nombre de **Sistema de Suministro de Energía Eléctrica**.

Las etapas que componen este sistema son:

1. **Generación.** La energía eléctrica se genera en las Centrales Eléctricas. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador, que produce energía en corriente alterna sinusoidal a voltajes intermedios.

2. Transmisión: La energía se transporta, frecuentemente a gran distancia de su centro de producción, a través de la Red de Transporte⁵, encargada de enlazar las centrales con los puntos de utilización de energía eléctrica. Para un uso racional de la electricidad es necesario que las líneas de transporte estén interconectadas entre sí con estructura de forma mallada, de manera que puedan transportar electricidad entre puntos muy alejados, en cualquier sentido. Estas líneas están generalmente construidas sobre grandes torres metálicas.

En Nicaragua el sistema de transmisión está determinado a valores de voltaje no menores a 69 kV.

3. Subestaciones: Son plantas transformadoras que se encuentran junto a las centrales generadoras (Subestación elevadora) y en la periferia de las diversas zonas de consumo (Subestación reductora), enlazadas entre ellas por la Red de Transporte.

4. Distribución: Es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales (medidor del cliente). Se lleva a cabo por los Operadores del Sistema de Distribución.

En Nicaragua el sistema de distribución corresponde a niveles de tensión menores a 69 kV.

⁵ Es la parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas.

5. Consumo: Son los clientes, los cuales pueden ser clientes residenciales, empresas o cualquier entidad a la que se le brinda el servicio de distribución de energía eléctrica.

Las ilustraciones (Figura 5 y Figura 6) muestran el proceso de suministro de energía eléctrica.

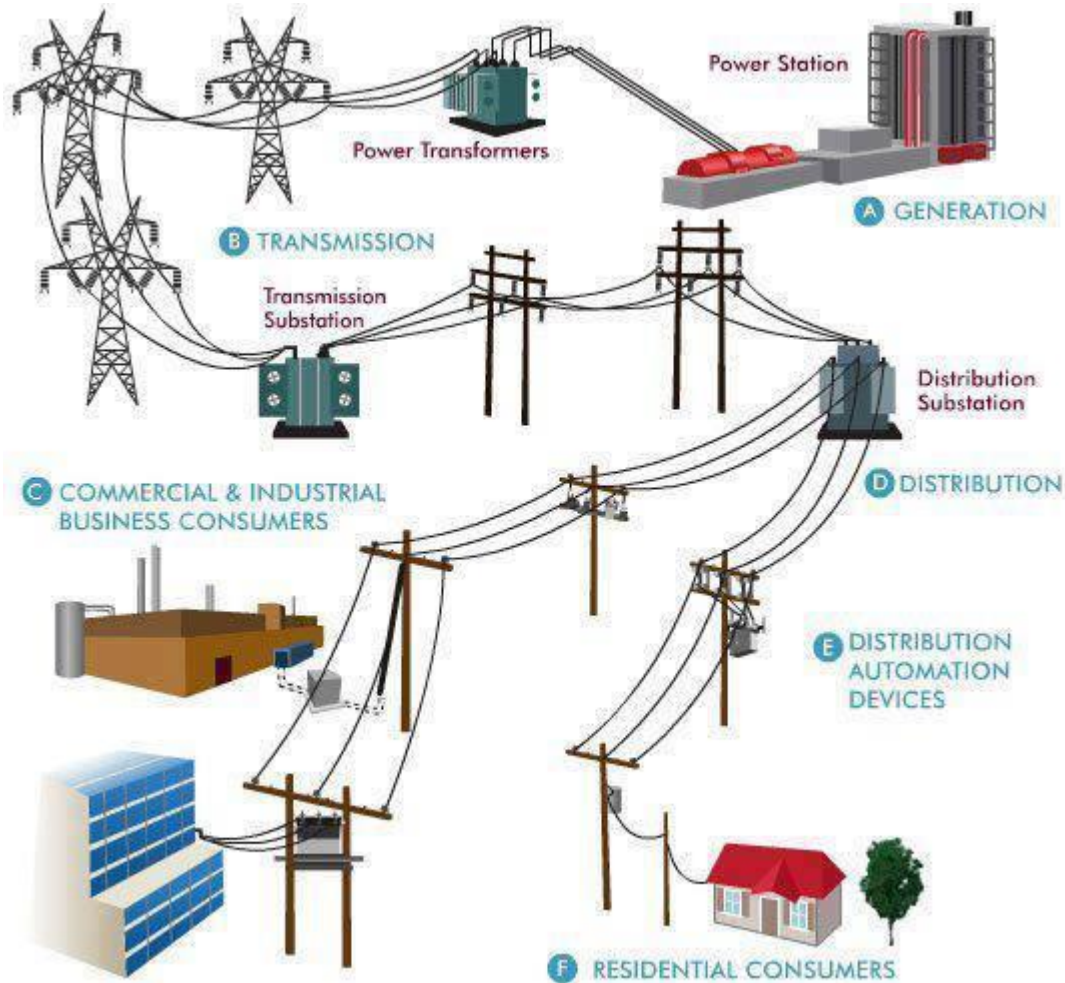
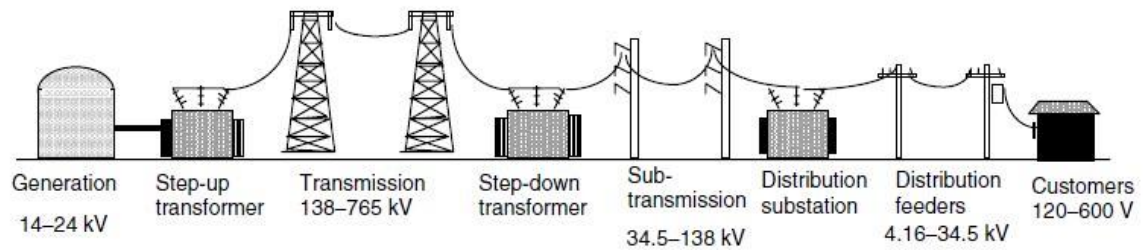


Figura 5: Sistema de suministro de energía eléctrica



Conventional power generation, transmission, and distribution system.

Figura 6: Diagrama de distribución de energía eléctrica

A través de las figuras anteriores detallan como tenemos energía en nuestros hogares. La figura a continuación permite visualizar los aparatos más comunes que se conectan en un hogar con consumo promedio de energía eléctrica.



Figura 7: Representación del consumo de energía eléctrica promedio

- **Circuito Eléctrico** es la interconexión de dos o más componentes que contienen una trayectoria cerrada⁶. De forma más clara; es un conjunto de elementos unidos de forma adecuada que permiten el paso de electrones.

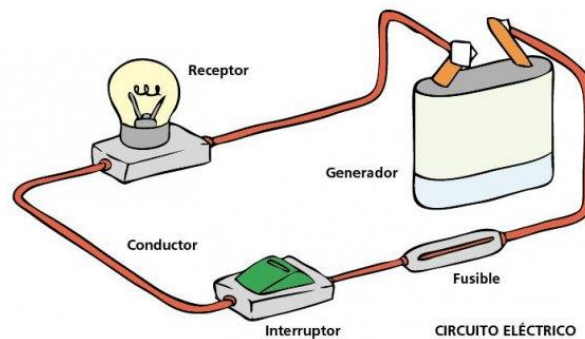


Figura 8: Ejemplo de un circuito eléctrico simple

- **Sistema eléctrico** es una serie de elementos o componentes eléctricos o electrónicos conectados eléctricamente entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales electrónicas o eléctricas.
- **Sistema monofásico** Es el sistema de producción, distribución, consumo de energía de una única corriente o fase (voltaje varía de la misma forma). En un sistema monofásico la corriente eléctrica alterna es la que circula por dos conductores, y también de los aparatos que se alimentan con esta clase de corriente [10].

En Nicaragua el sistema monofásico es: 120v monofásico, 2 polos más GND. Se tiene entonces 120v respecto a GND y 240v entre ellos.

⁶ Una red eléctrica que contiene camino de retorno para la corriente.

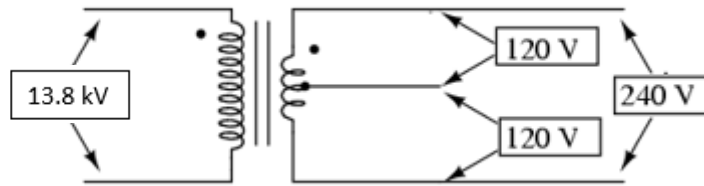


Figura 9: Sistema monofásico

La medición del consumo energético en nuestras residencias es de suma importancia para tener un mejor control de la energía aprovechada por nuestros equipos eléctricos. Es necesario entonces contar con un dispositivo que permita no solo llevar un registro de energía, sino también por medio del cual se pueda compartir datos a través de una computadora y tener así un mejor diagnóstico de la potencia real aprovechada. Como solución conceptual y practica se propone el Prototipo de Medición y Monitoreo de Energía.

MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los medidores de energía, técnicamente son aquellos que miden la cantidad de energía eléctrica en una carga [11]. Existen diferentes clases de medidores de energía.

- **Medidores electromecánicos o de inducción:** Están compuestos por un conversor electromecánico, es decir un vatímetro con un sistema de giro libre. El conversor actúa sobre un disco cuya velocidad de giro es proporcional a la potencia demanda.

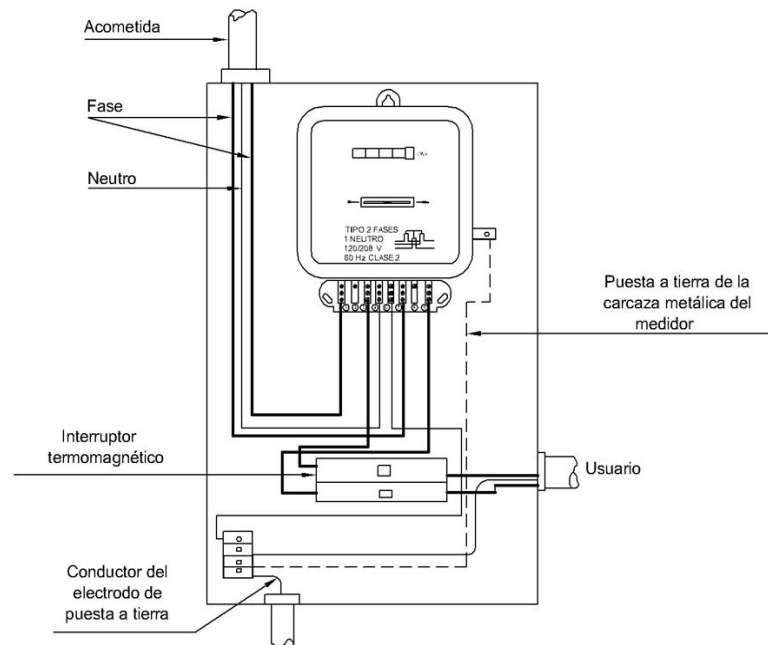


Figura 10: Diagrama de un medidor electromagnético

- Medidores electromecánicos con registrador electrónico:** En este tipo de medidores el disco giratorio se configura de tal manera que genere un tren de pulsos⁷ mediante un captador electrónico que sensa marcas grabadas en su capa superior. Los pulsos son procesados por un sistema digital que calcula y registra valores de energía y demanda. Tanto el medidor como el registrador suelen estar dentro del mismo módulo.

⁷ Dispositivo electromecánico que transforma la posición angular de un eje, a un código digital.

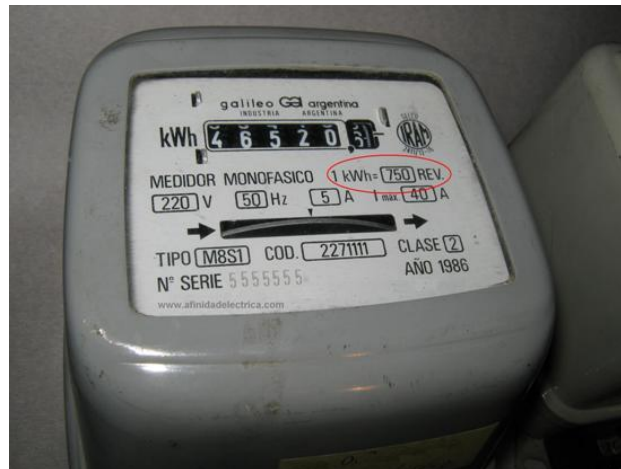
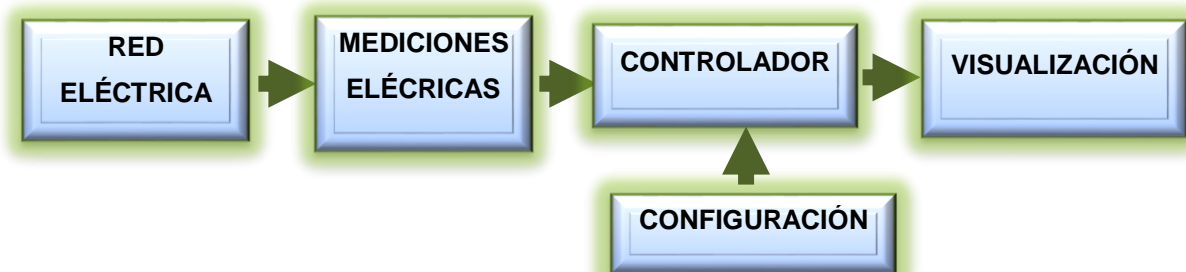


Figura 11: Medidor electromecánico con registrador electrónico

- **Medidores electrónicos:** Estos medidores se caracterizan debido a que la medición de energía y el registro se realizan mediante un proceso análogo-digital (sistema electrónico). Están basados en un sistema de control compuesto por microprocesador, un visualizador digital y memorias para almacenar, manejar y compartir datos a través de otros sistemas digitales.

Estos medidores monofásicos poseen una estructura interna sencilla y práctica, además son de fácil uso y bajo costo. Las etapas de los medidores pueden ser visualizadas por medio de su diagrama en bloques



Cada vez que se realizan mediciones eléctricas el controlador se encarga de que las variables sean mostradas en la pantalla y a través de pulsadores se puede seleccionar la variable que se desea leer.

Un ejemplo de estos medidores es el *Kill A Watt Meter* cuya función es medir la potencia activa de una carga mostrando el voltaje, la corriente, la frecuencia, el factor de potencia, todas esas variables por hora. Por medio de la siguiente figura se observa este dispositivo

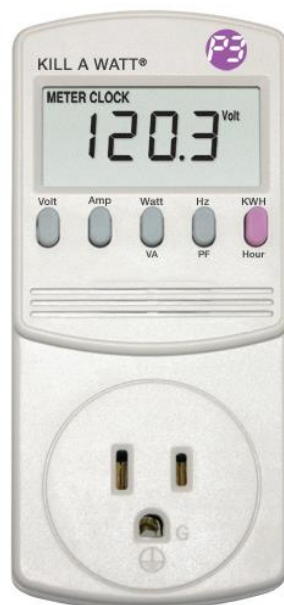


Figura 12: Medidor de energía Kill A Watt

Este medidor difiere del prototipo medidor de energía propuesto en que no se puede visualizar la fecha y la hora de la medición, así como que no se pueden almacenar los datos en una computadora, característica que lo hace interesante y práctico. Cabe destacar que siempre un prototipo de tesis tiene un costo un poco más elevado que un aparato comercial.

CAPÍTULO 2: PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE MONITOREO Y MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN CARGA CONECTADA A LA LÍNEA DE TENSIÓN SECUNDARIA MONOFÁSICA DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA RESIDENCIAL

El sistema electrónico de monitoreo y medición de energía eléctrica es un dispositivo digital que mide continuamente la energía eléctrica consumida por una carga en una línea de distribución eléctrica monofásica de dos cables⁸ localizada en sitios puntuales. Este equipo de medición tiene como función principal capturar las señales análogas de corriente y voltaje, digitalizarlas y luego procesarlas, obteniendo de este modo los valores de potencia y energía para almacenarlos y visualizarlos por medio de una pantalla de cristal líquido.

Estos medidores de energía son una solución para registro y control de la energía residencial consumida, ya que permite verificar el consumo energético impuesto por la empresa de distribución de energía eléctrica y de esta manera verificar el valor de los electrodomésticos individualmente.

La estructura del sistema de medición diseñado está compuesta por cinco etapas; las cuales se complementan para obtener los resultados de la medición. Estas etapas son detalladas de la siguiente manera.

2.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA

Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación o fuente de poder es la unidad que provee alimentación⁹ a los circuitos electrónicos para llevar a cabo sus funciones. Su propósito principal

⁸Cable de línea o fase y cable de neutro.

⁹ En otras palabras , energiza los circuitos electrónicos

es convertir la tensión alterna de la red eléctrica en una tensión continua que permita energizar los dispositivos y los mantenga en un estado estable o constante.

La organización de una fuente de alimentación consta de los siguientes dispositivos:

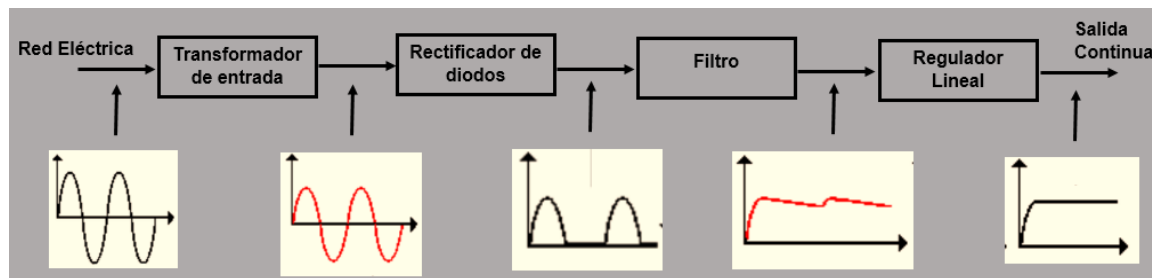


Figura 13: Diagrama de una fuente de alimentación

El transformador es el componente que se encarga de reducir el voltaje de corriente alterna proveniente de la red eléctrica, el voltaje del secundario dependerá del número de espiras del transformador.

El diodo puente-rectificador convierte la señal AC en una señal de corriente continua pulsante, es decir elimina la parte negativa y solo deja pasar la parte positiva.

El filtro está compuesto por una red de condensadores que eliminan la componente de señal alterna entregada por el rectificador; debido al proceso de carga y descarga del capacitor resulta un rizado en la señal de salida del filtro.

Los reguladores de voltaje se encargan de ajustar o mantener constante el voltaje de salida que será entregado a la carga, su salida es una señal DC que permite ser conectada a los dispositivos electrónicos y una vez energizados éstos, están listos para realizar su determinada función.

Adquisición de datos

Esta etapa inicial del sistema es donde se lleva a cabo las mediciones eléctricas, es decir, la recepción de las señales de corriente y tensión de línea. Si bien la señal de tensión puede obtenerse mediante un circuito analógico (Ver figura 9) que atenúe la fase de una red de distribución de energía; la corriente en cambio necesita de un dispositivo que adecue su forma de onda¹⁰. En otras palabras, se requiere de un sensor de corriente que convierta la magnitud de corriente de una línea de distribución a un nivel de corriente o voltaje directamente equivalente.

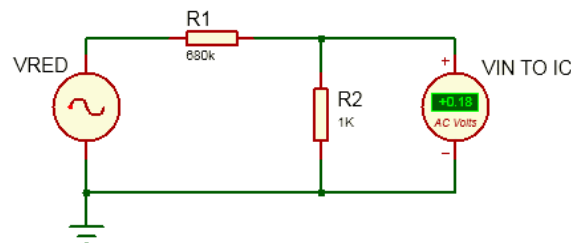


Figura 14: Representación de un circuito para la obtención de la señal de voltaje

Los sensores de corriente más comunes son:

- Resistivos (por lo general llamados shunt o derivador de corriente)

Un shunt es una resistencia de alambre que posee un coeficiente de temperatura muy bajo, se coloca en serie con la carga permitiendo obtener una tensión entre sus bornes, proporcional a la corriente por la misma. Hay que tener en cuenta que la inductancia parásita del shunt afecta la magnitud de la impedancia a frecuencias relativamente altas [12]. Es el sensor popularmente más usado para medir corriente por su bajo costo; sin embargo, dado que es un elemento resistivo las pérdidas debido al calor son considerables.

¹⁰ Es la representación visual o gráfica del valor instantáneo de la señal, trazada contra el tiempo.

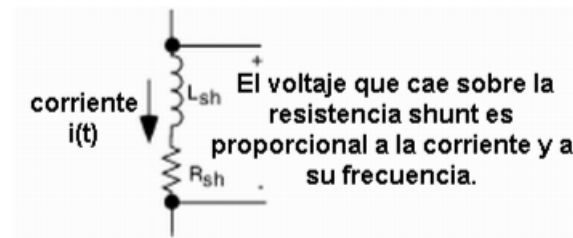


Figura 15: Modelo de un sensor Shunt con capacitancia parásita

➤ Inductivos (transformadores de corriente TC)

El TC al igual que el transformador de voltaje consiste en transformar una corriente primaria alta en una corriente secundaria reducida (por lo general pequeña). La desventaja más notoria es que como el núcleo está construido de un material ferroso al existir una corriente muy alta, éste puede saturarse y provocar histéresis y no linealidad a la salida.

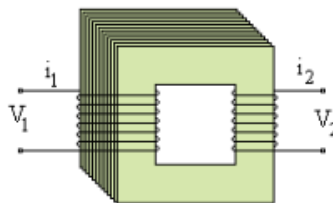


Figura 16: Transformador de corriente

➤ Bobina Rogowski.

Consiste en un embobinado toroidal cuyo núcleo puede ser de aire o un dieléctrico ubicado perpendicularmente con la corriente a medir, de manera que su campo magnético circular atraviesa las espiras induciendo un voltaje proporcional a la inductancia mutua y la derivada de la corriente primaria [13].

La bobina Rogowski combinada con un integrador digital ofrece una solución competitiva al momento de sensor corriente debido a que la salida es independiente de la frecuencia, lo que permite tener exactitud de repuesta de fase y a través de lo cual se pueden hacer mediciones de formas de corriente complejas.

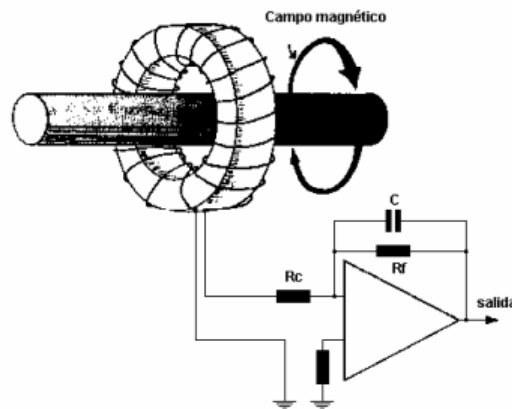


Figura 17: Bobina Rogowski

➤ Magnéticos (Efecto Hall).

Los sensores de efecto hall residen en la aparición de un campo eléctrico cuando un conductor es atravesado por un campo magnético, es decir que al fluir corriente por un conductor en presencia de un campo magnético que fluye en dirección vertical al conductor, se produce un voltaje que es proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente.

Existen dos tipos principales de sensores de Efecto Hall, anillo abierto (open-loop) y anillo cerrado (closed-loop). El segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más amplios pero a un costo mayor, y la mayoría de los sensores de Efecto Hall que se encuentran en medidores de energía usan el diseño anillo abierto para lograr costos más bajos. El sensor de Efecto Hall tiene una excelente respuesta a la frecuencia y está capacitado para medir corrientes muy altas. Sin

embargo, las desventajas incluyen un resultado con alta deriva por temperatura y la necesidad de circuitos externos de control.

- **Comparativa entre sensores:**

Tecnología del sensor	Shunt de corriente	Transformador de corriente	Sensor de Efecto Hall	Bobina Rogowski
Costo	Muy bajo	Medio	Alto	Bajo
Linealidad en el rango de	Muy buena	Buena	Pobre	Muy buena
Capacidad de medición de alta corriente	Muy pobre	Buena	Buena	Muy buena
Consumo de potencia.	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Problemas de saturación de corriente DC	No	Si	Si	No
Variación de la salida con respecto a la Temperatura	Medio	Bajo	Alto	Muy bajo
Problema Offset de DC	Si	No	Si	No
Problema de saturación e histéresis	No	Si	Si	No

Tabla 1: Comparativa entre tecnología de sensores

El sensor propuesto para la medición de corriente es el ACS712, sensor de efecto Hall de lazo abierto de 20 Amperios. Dicho sensor se seleccionó debido a que presenta características como: bajo costo, fácil manipulación, sencilla manera de operación, proporcionalidad en el voltaje de salida respecto a la corriente medida, precisión (porcentaje de error mínimo) y su amplio rango de temperatura de trabajo.

Sensor de corriente ACS712-20 Amperios

- Teoría de Funcionamiento

Como se mencionó anteriormente el Efecto Hall se basa en que cuando pasa un cuerpo con cierta carga eléctrica por un campo magnético, al pasar se crea un potencial que se convierte en una pequeña señal eléctrica, esta después de pasar por filtros, preamplificador y un circuito rectificador nos da una señal de lectura.

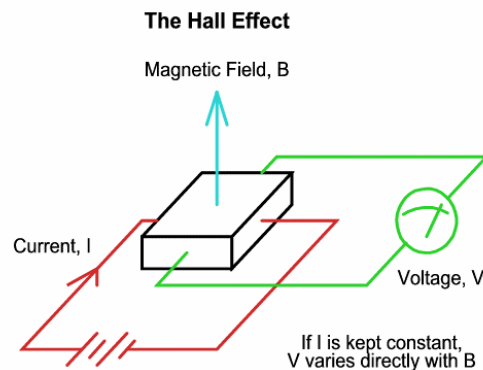


Figura 18: Principio del efecto Hall

Este sensor además de ser económico provee una amplia y precisa solución para la medición de corriente tanto AC como DC en áreas industriales, comerciales, así como para sistemas de comunicaciones

El ACS712 consiste de un circuito Hall de precisión y bajo nivel de offset con un path¹¹ de cobre localizado cerca de la superficie troquel (molde), de manera que al aplicarse corriente sobre este se genera un campo magnético, el cuál es convertido por el IC a un voltaje proporcional a la corriente de entrada. Cabe

¹¹ Camino, recorrido, zona de un dispositivo recubierta de cobre para la circulación de corriente.

destacar que la corriente que circula puede ser tanto DC como AC y que esta entra por los pines 1 y 2 y retorna por los pines 3 y 4 [14].

Pin-out Diagram

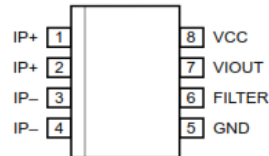


Figura 19: Diagrama del sensor ACS712

Existen tres tipos de diseño de este sensor según la capacidad de corriente: de 5, 20 y 30 Amperios. El que se utilizó para el diseño fue el de 20 Amperios que posee una sensibilidad de (100mV/A) (ver figura 15).

Part Number	Packing*	T _A (°C)	Optimized Range, I _p (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66

Figura 20: Sensibilidad de los sensores de la familia ACS712

La tabla 2 muestra los pines de asignación del sensor.

No. Patilla	Nombre	Descripción
1 y 2	IP+	Terminales para el muestreo de corriente. Optoacopladas internamente
3 y 4	IP-	Terminales para el muestreo de corriente. Optoacopladas internamente
5	GND	Tierra
6	FILTER	Terminal para capacitor externo
7	VIOUT	Señal de salida análoga
8	VCC	Alimentación

Tabla 2: Asignación de pines del sensor de corriente ACS712

Control

El procesamiento digital consiste en digitalizar¹² las señales analógicas, es decir muestrear, cuantificar y codificar las señales con el fin de que éstas tomen valores que pueden ser ponderados¹³. Esto se logra por medio de dispositivos electrónicos que contengan conversores análogo-digital¹⁴, circuitos de compensación de fase, detectores de cruce por cero, integradores digitales.

Para esta etapa necesitamos seleccionar un dispositivo capaz de controlar varios procesos. Y para estos problemas los microcontroladores son la solución. **Los microcontroladores PIC** (Peripheral Interface Controller) son una familia de

¹² Añadir valores discretos a determinada señal.

¹³ Conjunto finito de valores.

¹⁴ ADC.

microcontroladores tipos RISC¹⁵ fabricados por la compañía Microchip Technology Inc. Son dispositivos integrados capaces de llevar a cabo procesos lógicos parecidos a una computadora, con la diferencia de contener todos los elementos en un solo chip [15]; consecuentemente, son los módulos idóneos para manejar a los demás dispositivos: enviar datos a la LCD, leer caracteres del teclado matricial, manejar el reloj de tiempo real, intercambiar datos con la PC, así como leer datos de la memoria externa.

El microcontrolador que desempeña las funciones del sistema es el **PIC18F2525**. Este IC es el encargado de manejar a los demás dispositivos: enviar datos a la LCD, leer los valores provenientes de la etapa de adquisición de datos, manejar el reloj de tiempo real, intercambiar datos con la PC, así como leer datos desde la SD Card.

Este PIC fue considerado como ideal por su amplia cantidad de interrupciones y juego de instrucciones y su reducido número de pines; con el objetivo de utilizar las funciones necesarias y hacerlo de forma eficiente pues el PIC 16F877A no cuenta con las interrupciones necesarias para satisfacer el desarrollo del proyecto mientras que el PIC 18F4550 tiene una amplia cantidad de instrucciones y canales analógicos, características especiales como la comunicación USB, y 40 pines de manera que hubiese estado sobreutilizado.

¹⁵ Set de Instrucciones Reducido: Arquitectura computacional que propone instrucciones simples con el objetivo de optimizar hardware y software.

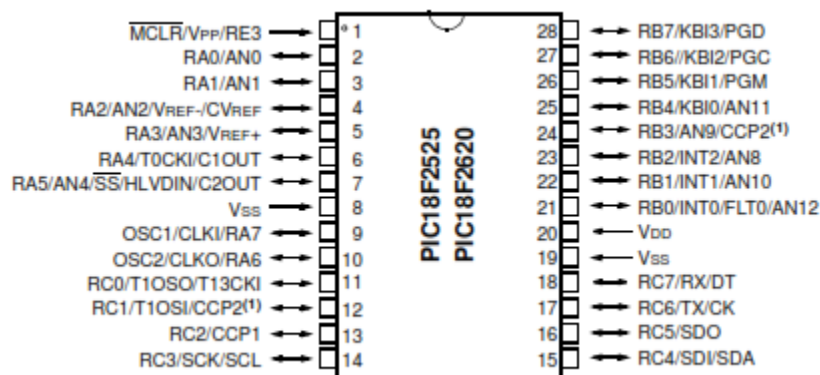


Figura 21: Microcontrolador PIC18F2525

- Principales Características

Descripción	Rangos
Frecuencia de operación	40 MHz
Memoria de programa	49.152 bytes
Memoria de programa	24576 instrucciones
Memoria RAM de datos	3968 bytes
Memoria EEPROM de datos	1024 bytes
Interrupciones	19
Líneas E/S	Puertos A, B, C, E
Temporizadores	4
Módulos de comparación/Captura/PWM	2
Canales de comunicación serie	MSSP, EUSART
Canales de conversión A/D	10 (10-bits)
Juego de instrucciones	75 (83 ext.)

Pines	28
-------	----

Tabla 3: Principales características del PIC 18F2525

Visualización

La **pantalla de cristal líquido LCD** es el dispositivo que tiene la capacidad de mostrar caracteres alfanuméricos permitiendo representar la información que genera cualquier equipo electrónico de manera sencilla [16].

El LCD presentará los valores del cálculo de energía, la fecha y hora en que fue realizada la medición, además de los diferentes mensajes programados por el usuario, así como el menú que éste determine.

El LCD a utilizar es de 20x4 (20 filas por 4 columnas), **DISPLATECH 204 SERIES**, tal como el mostrado en la figura 17.

La pantalla de cristal líquido tiene un consumo reducido de potencias (en el orden de mW), es una pantalla de caracteres ASCII y la forma de gobernación que se opta es una conexión de bus de 4 bits de datos.



Figura 22: Pantalla LCD DISPLATECH 204 SERIES

- Asignación de pines LCD 4x20

Patilla	Símbolo	Función
1	VSS	Tierra
2	VDD	Tensión positiva de alimentación
3	VO	Tensión para contraste de pantalla (potenciómetro de 10 K Ω conectado a GND)
4	RS	Selector de Dato/Instrucción
5	R/W	Selector de Lectura/Escritura
6	E	Habilitación del módulo
7	DB0	BUS DE DATOS
8	DB1	
9	DB2	
10	DB3	
11	DB4	
12	DB5	
13	DB6	
14	DB7	
15	A (+)	Luz de fondo del Ánodo (resistor de 10 Ω conectado a VCC)
16	K (-)	Luz de fondo del Cátodo (Conexión a tierra)

Tabla 4: Asignación de pines LCD DISPLATECH 204 SERIES

Sincronización

- Reloj de tiempo real **DS1307**

El DS1307 es un reloj/calendario, es el componente que proporcionara al sistema los segundos, minutos, hora, fecha, mes y año.

Este RTC de 64K x8, es el componente que proporcionara al sistema los segundos, minutos, hora, fecha, mes y año. También se puede ajustar el formato de hora tanto en 24, como con el indicador AM, PM. Este reloj BCD¹⁶ tiene incorporado un circuito de detección de potencia que detecta fallos de energía y cambia automáticamente a la fuente de la batería [17].

El DS137 utiliza el protocolo de comunicación I²C¹⁷, el cuál se comunica con el microcontrolador a través de las líneas SDA para transferencia de datos de manera bidireccional Y SCL que genera la señal de reloj para empezar y finalizar las transferencias. En la figura 16 pueden observarse estas dos líneas.

Las particularidades principales que caracterizan al reloj de tiempo real son:

- Memoria RAM de 56 bytes para almacenamiento de datos, con batería de respaldo no volátil.
- Interface Serial de comunicación I²C.
- Señal de salida de onda cuadrada programable.
- Circuito de detección y conmutación automático.
- Consumo de corriente en modo de respaldo de batería con el oscilador de funcionamiento < 500 nA.
- Rango de temperatura: -40 °C a +85 °C.

¹⁶ BCD (binary coded decimal): decimal codificado en binario es un estándar para representar números decimales en el sistema binario

¹⁷ Inter Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrado).

- Encapsulados: Tipo DIP o SOIC.

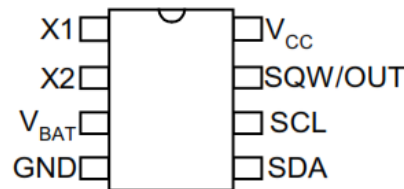


Figura 23: Reloj de tiempo real DS1307

Almacenamiento

Una de las etapas fundamentales para el diseño de proyectos con microcontroladores o cualquier plataforma de hardware libre es el almacenamiento de datos, visto que es indispensable tener un respaldo de la información acumulada.

La memoria EEPROM es el dispositivo que comúnmente se emplea para guardar los datos con PIC, pero debido a su restringida capacidad de almacenamiento para obtener los valores acumulados y su inflexibilidad (rigidez) para comunicarse como interfaz con otros componentes resulta insuficiente.

Por consiguiente las MMC¹⁸/SD Card¹⁹ son la solución para registrar cantidades de información de mayor tamaño, en especial si queremos visualizar los datos a través de una interfaz de comunicación.

Las MMC/ SD Card son tarjetas de memoria flash²⁰ fabricadas originalmente por Sandisk²¹ utilizados para almacenar información de manera sencilla. Las MMC

¹⁸ Multimedia Card (Tarjeta multimedia).

¹⁹ Security digital Card (Tarjeta de seguridad digital).

²⁰ Memoria borrrable y reprogramable electrónicamente.

²¹ Es una empresa estadounidense dedicada al desarrollo y fabricación de dispositivos de memoria flash para el almacenamiento de información.

difieren de la SD Card debido a su capacidad de almacenamiento y su velocidad de transferencia de datos [18].

La SD Card es la evolución de la MMC y por lo tanto sus características son superiores, tanto así que las MMC iniciaron con capacidades de 128, 256, 512 MB, de modo que al surgir las tarjetas SD comenzaron con capacidades de 1, 2, 4, 8, 16, 32 hasta ofrecer hoy en día 512 GB.

La velocidad de transferencia de cada una de las tarjetas de memoria se ha incrementado a través del paso de los años. La MMC inició con una velocidad de transferencia de 2.5 MB/s de lectura y escritura, actualmente la SD Card presenta tasas de lectura de 90 MB/s y 95 MB/s de escritura.

Tipos de memorias SD

Desde que se presentó el formato SD Card al mercado sus versiones se han venido modificando debido a la necesidad de transferir datos con mayor velocidad. Se percibió que no era suficiente la capacidad de almacenamiento que ofrecían de modo que surgieron entonces las SDHC (Secure Digital High Capacity) con capacidades de entre 4GB hasta 32GB. Sin embargo siguieron evolucionando y apareció SDXC (Secure Digital Extended Capacity) que como su nombre lo indica tienen una capacidad extendida de hasta 2TB de información y se encuentran en velocidades de 3000 MB/s.

Otros Formatos

Además de los formatos mencionados han emergido formatos mini y micro que se usan como memorias externas, son formatos de menor tamaño utilizados en host²² tales como: teléfonos móviles, GPS, videoconsolas con sockets²³

²² Dispositivo que funciona como el punto de inicio y final de las transferencias de datos.

²³ Zócalo o placa base donde se instalan dispositivos de almacenamiento para la transferencia de datos.

especiales. Estas tarjetas también vienen en formatos de alta y extendida capacidad (HC y XC) y de igual manera soportan capacidades de hasta 2TB de datos y hasta velocidades de transferencia entre los 90 Mb/s de lectura y los 80 Mb/s de escritura [18].

MMC/SD Card en microcontroladores PIC

Almacenar datos en microcontroladores de la familia PIC resulta sencillo y rápido, así pues mediante una tarjeta de memoria MMC/ SD se puede llevar a cabo un datalogger que no es más que un dispositivo registrador datos en tiempo real por medio de sensores e instrumentos de medición electrónica.

Existen tres modos de transferencia soportados por las tarjetas de memoria en PIC:

- Modo un-bit SD: separa comandos, canales de datos y un formato propietario de transferencia.
- Modo cuatro-bit SD: utiliza terminales extra más algunos terminales reasignados para soportar transferencias paralelas de cuatro bits.
- Modo SPI: entrada separada y salida serial.

El modo SPI²⁴ es el indicado para trabajar con tarjetas de memoria debido a su funcionalidad práctica.

El bus SPI utiliza cuatro señales lógicas o líneas de comunicación:

- SCLK: serial clock (salida del dispositivo maestro).

²⁴ Serial Peripheral Interface es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj.

- MOSI (DATA IN): master output slave input (salida del dispositivo maestro).
- MISO: (DATA OUT) master input, slave output (salida del dispositivo esclavo).
- SS: slave select, también representado como CS o chip select (activo bajo, salida del dispositivo maestro).

Patilla	Nombre	Descripción
1	CS	Activación de tarjeta
2	DATA IN	Comando de datos desde el host
3	VSS	Tierra
4	VDD	Alimentación
5	CLK	Reloj
6	VSS	Tierra
7	DATA OUT	Datos hacia el host
8	RSV	Reservado
9	RSV	Reservado

Tabla 5: Asignación de pines de una MMC/SD Card

Formato de comunicación en SPI

La secuencia de comandos para la tarjeta en modo SPI consiste de 6 bytes, como se detalla en la tabla 6.

Byte 1		Byte 2-5		Byte 6	
7	6	5-----0	31-----0	7	0
0	1	Comand	Comand	Comand	1

Tabla 6: Secuencia de comandos SPI

- El primer byte es el comando (escritura, lectura).
- Del segundo byte al quinto son datos adicionales, por ejemplo dirección.
- El sexto byte es un byte de verificación.

Comandos por comunicación SPI

La memoria contiene varios comandos que funcionan por comunicación SPI, así:

- Reset de la memoria comando 0 (CMD0).
- Inicialización de la memoria comando 1 (CMD1).
- Configuración del bloque de 512 bytes comando 16 (CMD16).
- Escritura de un bloque de 512 bytes (CMD24).
- Lectura de un bloque de 512 bytes comando 17 (CMD17).

Una vez enviado el respectivo comando, la memoria responde por medio de un registro llamado R1 (ver figura 19) indicando si hubo un error o si todo está correctamente.

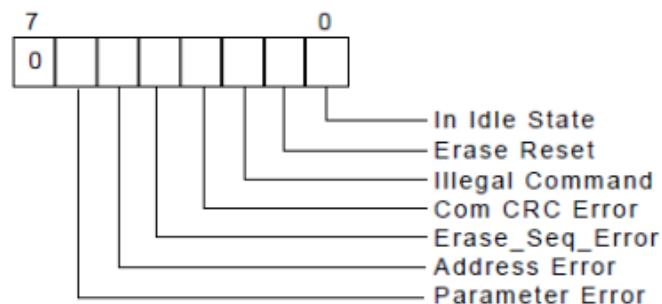


Figura 24: Registro de errores enviado por la memoria

Funcionamiento de la memoria en modo SPI

Para que la memoria pueda escribir o leer un sector determinado primero se debe inicializar en modo SPI, además para que la ella se inicialice de forma correcta se debe enviar el comando CMD0, CMD1 y CMD16

Para inicializar la memoria, el PIC debe enviar los seis bytes del comando CMD0, lo seis bytes de comando CMD1 y los seis bytes del comando CMD16.

Al comenzar la memoria se establece en modo SD. Para entrar en modo SPI se debe enviar el comando CMD0 con el pin CS a 0V, si la memoria reconoce la petición de cambio de protocolo responde con la respuesta R1 (0x01).

Para configurar el bloque de escritura y lectura (CMD16) el microcontrolador debe enviar los argumentos del comando (6 bytes) indicando en los 4 bytes adicionales (2-5 Bytes) el tamaño del bloque.

Escritura y lectura de un bloque de 512 Bytes

Las operaciones de lectura y escritura se realizan enviando el comando correspondiente junto a la dirección del primer byte del bloque con el largo indicado anteriormente (Comando CMD16). El largo del bloque puede ser desde 1 hasta 512 Bytes, y no está permitido realizar operaciones en dos sectores a la vez, o sea que si el largo de bloque fijado en CMD16 es 512 Bytes, la dirección para realizar lectura o escritura debe ser la del byte inicial del sector.

Para realizar escritura de un único bloque debemos enviar el comando CMD24 (0x58, 0x00, 0x00, 0x02, 0x00, 0xFF) indicando la dirección del bloque en el argumento de la función. La memoria al reconocer el comando envía la respuesta R1, donde puede indicar si hay algún error. Si todo es correcto el PIC debe enviar

un token²⁵ (0xFE) y luego los 512 datos del bloque más 2 bytes de CRC. Luego de enviados estos datos debemos quedar a la espera de una respuesta de la memoria indicando si los datos se han recibido correctamente o ha ocurrido un error, además de condición de desocupado. Si no hubo un error la memoria responde con 0x05.

Para realizar una lectura debemos enviar el comando CMD17 (0x51, 0x00, 0x00, 0x02, 0x00, 0xFF) indicando en el argumento la dirección del bloque. Luego se espera la respuesta R1 desde la memoria, si todo es correcto se pasa a recibir el token (0xFE) y luego los datos, la cantidad es establecida por el largo del bloque (CMD16).

²⁵ Cadena de caracteres que indica que un mensaje ha sido leído o enviado.

CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Una de las etapas fundamentales en el desarrollo de proyectos electrónicos es la simulación de circuitos, así como la programación del hardware libre, que en nuestro caso corresponde al microcontrolador de la familia PIC. Para ello nos apoyaremos de los siguientes softwares:

- PCWHD Compiler, versión 5.8.3.14. Custom Computer Services Inc.

También conocido como PIC C Compiler® o CCS es el compilador de alto nivel para el desarrollo de aplicaciones de sistemas integrados (Embedded Application) que se ejecutan en Microcontroladores PIC (PIC® MCU) [19]. Se escogió este compilador debido a su manera sencilla de interactuar y su amplia librería para el manejo de dispositivos. Los códigos de programación son cargados en el PIC con la ayuda de software de simulación Proteus.



Figura 25: Compilador PIC C Compiler de CCS, Inc.

- Proteus 8 Professional v8.3 SP2®. Labcenter Electronics.

Es un software que facilita el modelado de sistemas virtuales (VSM²⁶) que combina simulación de circuitos SPICE, componentes animados y modelos de microprocesadores para la co-simulación de diseños basados en microcontroladores. Esto permite el desarrollo y pruebas de estos diseños antes que un prototipo físico sea construido [20]. La selección de ISIS está basada en el potencial de ejecutar simulaciones lo más cercano al tiempo real y mediante indicadores, pruebas lógicas, pantallas LCDs, se puede observar el comportamiento del sistema [21]. El software permite mezclarse con CCS para la ejecución de programas mediante el archivo .hex y la depuración de errores a través del archivo .cof.

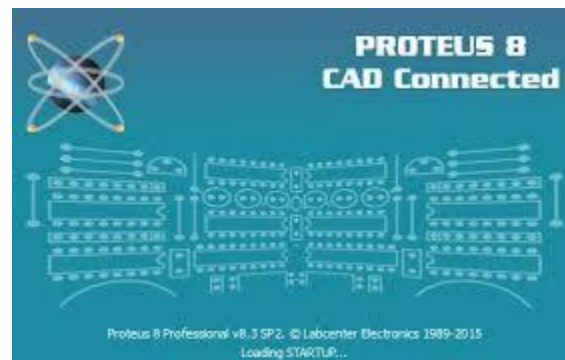
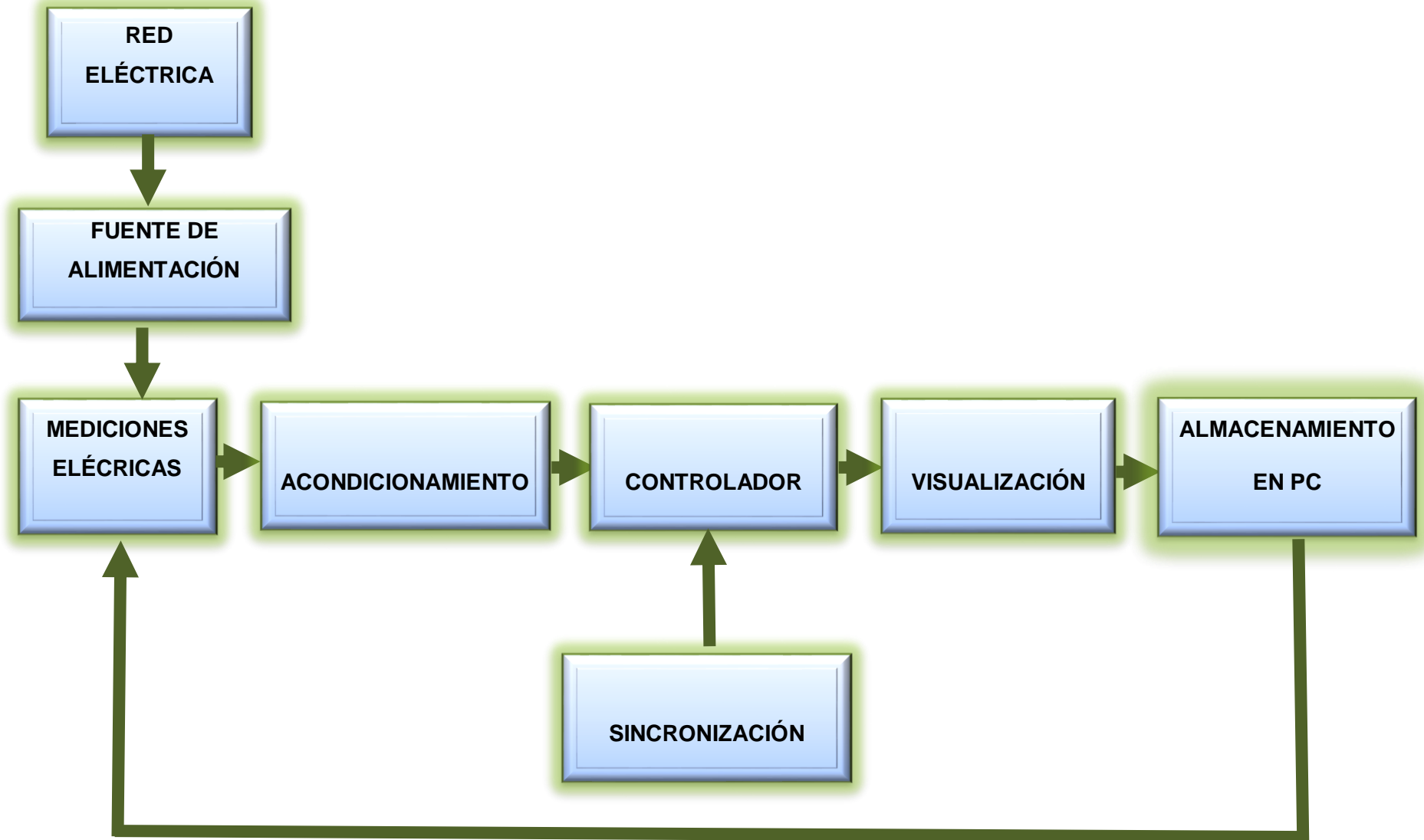


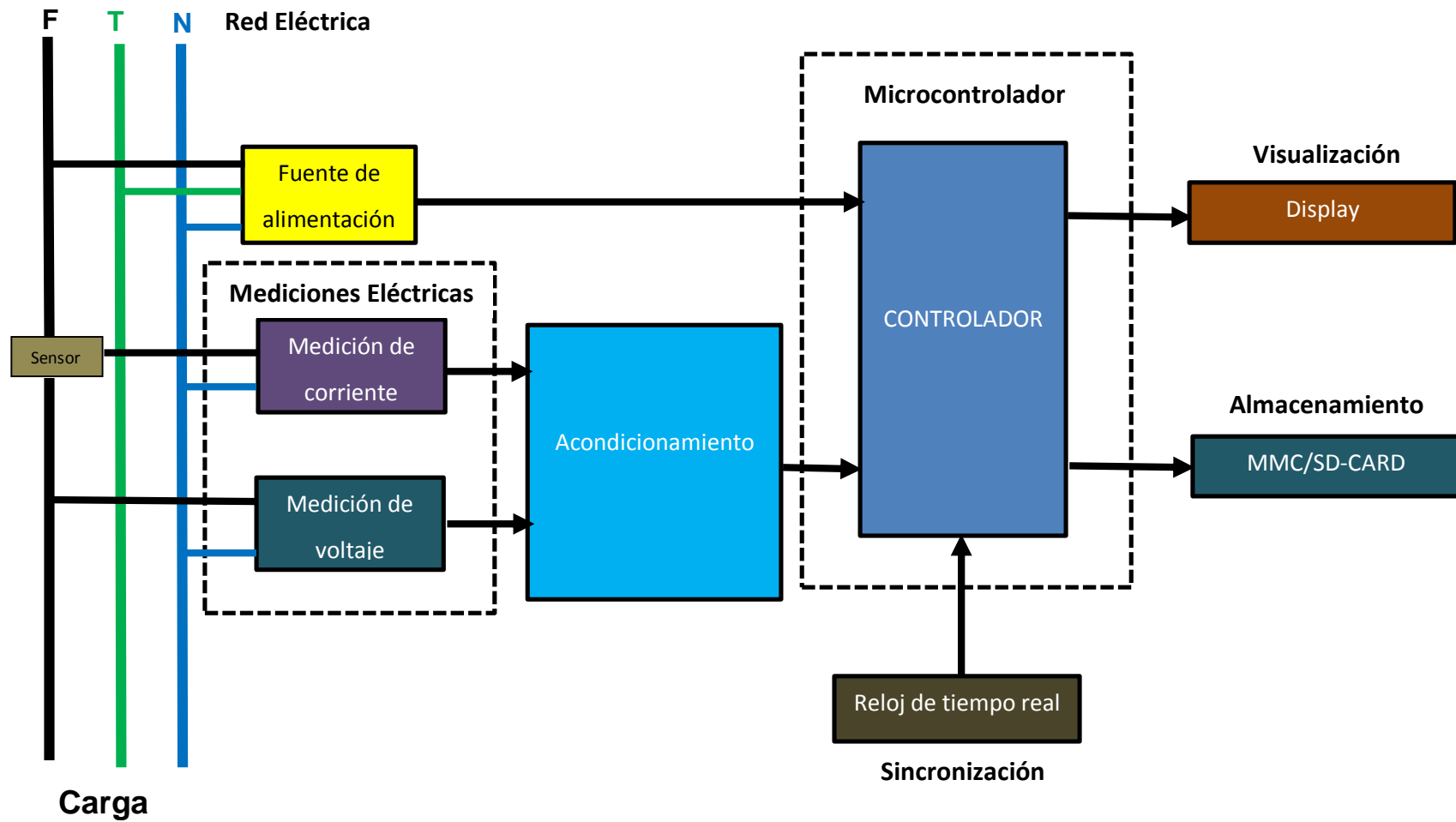
Figura 26: Software Proteus de Labcenter Electronics

²⁶ Virtual System Modelling.

CAPÍTULO 4: DIAGRAMAS

4.1: DIAGRAMA EN BLOQUES DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA MONOFÁSICO.

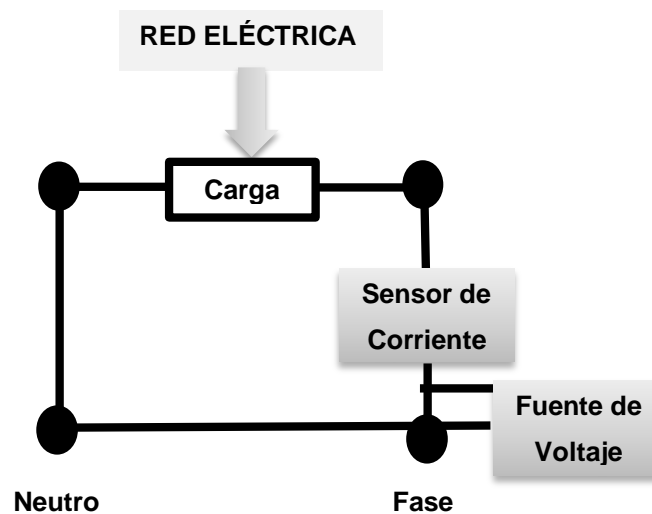




El diagrama expone el principio de operación del prototipo medidor.

Cada rectángulo representa un proceso y cada flecha indica la dirección del proceso.

La red eléctrica indica que el sensor de corriente se encuentra en serie con la línea y que la fuente de alimentación se encuentra en paralelo.



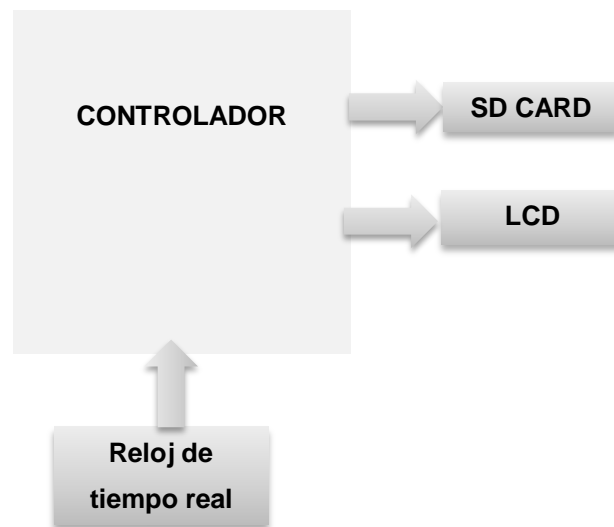
La etapa de medición eléctrica está compuesta por la red de tensión y el sensor de corriente, aquí se realiza la medición de las señales análogas por medio de los dispositivos correspondientes.

Luego se encuentra el del bloque de acondicionamiento, el cual es una red de OP-AMPs de corrección-amplificación de corriente, compuesta por cuatro etapas: corrección, rectificación, amplificación y señal DC. Para la señal de magnitud de voltaje existe una red de divisor de voltaje y un capacitor de modo que las señales provenientes de ambos circuitos entran a las entradas analógicas del microcontrolador. Para las fases de las señales de tensión y corriente se utilizó el comparador LM393, lo que las convierte en señales de onda cuadrada con el fin de determinar el desfase entre ellas.

Estas señales de magnitud (dos señales. Una de voltaje y otra de corriente) entran a las entradas analógicas del microcontrolador para ser discretizadas y muestreadas en los canales analógicos del PIC, las señales de fase por su parte están conectadas a los módulos CCP para determinar la diferencia de fase entre ambas señales (ancho de pulso).



La etapa de control está compuesta por microcontrolador también es el responsable de enviar los caracteres a la LCD, el dispositivo por medio del cual se visualizan los valores de las variables acondicionadas, además recibe las señales provenientes de los pulsadores para las diferentes configuraciones que se le determine, también recibe las señales provenientes de la sincronización para posteriormente proceder a la visualización.



La sincronización la conforma el reloj de tiempo real, el cual es configurado vía protocolo de comunicación I2C y es el dispositivo encargado de establecer la fecha y la hora de las mediciones.

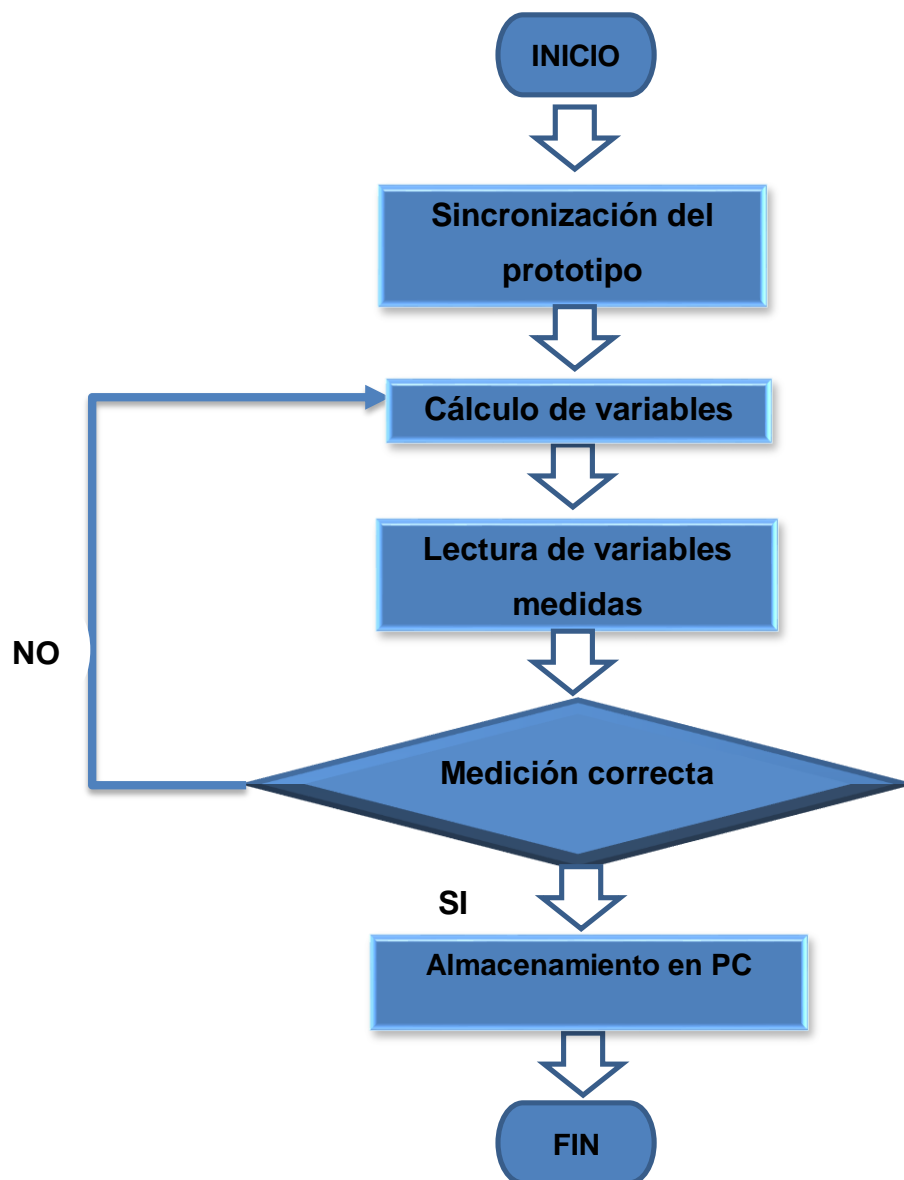
Los datos se muestran a través del bloque de Visualización a través de la pantalla de cristal líquido LCD.

El bloque de almacenamiento de datos en PC está a cargo de la memoria MMC/SD Card la cual se encargan de almacenar los datos con su fecha y hora respectivamente para mediante el protocolo SPI implementar la comunicación serial y extraer los datos provenientes de la multimedia card en la PC con el fin de visualizarlos en un archivo de coma flotante .csv mediante la aplicación Microsoft Excel.



Esta secuencia se describirá con más detalles a en los siguientes capítulos del documento.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE CÓDIGO DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA MONOFÁSICO



El principio de funcionamiento del prototipo medidor de energía monofásico mediante el diagrama de flujo tiene la siguiente estructura:

1. La primera acción es la sincronización del prototipo donde se setea la fecha, y el hora de las mediciones. En esta sección dentro del código del programa se encuentran las variables declaradas, se incluyen las librerías externas y la configuración de las fuses (directivas) correspondientes.
2. Acto seguido el prototipo realiza la medición y el cálculo de las variables eléctricas: voltaje, corriente (magnitud y fase), potencia aparente, potencia activa, factor de potencia y energía activa.
3. Las variables son presentadas en pantalla, refrescándose cada tantos ms (según configuración) con su fecha y hora correspondiente.
4. Luego de la impresión de las variables, si la medición es correcta se procede al almacenamiento en la memoria SD Card, a través del protocolo SPI.
5. Si el almacenamiento fue correcto, se procede a la visualización de la información guardada en la memoria mediante la PC, sino se realiza nuevamente el cálculo de las mediciones eléctricas.
6. FIN: Ejecuciones finalizadas correctamente.

V EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL PROTOTIPO MEDIDOR DE ENERGÍA

El diseño de este proyecto se realizó tomando en cuenta los alcances que se pretendían lograr:

1. **USO:** Exclusivamente residencial.
2. **TIPO DE RED:** Monofásica.
3. **NIVEL DE VOLTAJE NOMINAL:** 120 voltios DC.
4. **NIVEL DE CORRIENTE MÁXIMA** 20 A.
5. **FRECUENCIA NOMINAL:** 60 Hz.
6. **TIEMPO DE ALMACENAMIENTO:** Continúo (Determinado por el usuario).
7. **COMUNICACIÓN:** Serial.
8. **TIEMPO ESTIMADO DE DESARROLLO:** 6 meses.
9. **MONTO DE INVERSIÓN:** Bajo costo.

Estos constituyen los factores fundamentales para la consecución de los objetivos planteados. Para esto de las herramientas de soporte primordiales fueron los softwares de simulación y programación.

Simulación y Código de Programación

Si bien la teoría complementa a la práctica siempre existen detalles que las diferencian entre sí, ya que en la realidad los errores debido a factores como: variaciones temperatura, humedad, los ajustes de calibración, etc. son más notables que al ser simuladas en un computador. Por esto el código de programación y la simulación constituyen etapas primordiales en el diseño de proyectos electrónicos.

Es vital conjuntar entonces estas etapas dado que la mayoría de los dispositivos digitales electrónicos requieren de la programación para poder realizar la simulación correspondiente

Debido a que algunos de los componentes electrónicos no están en las librerías de Proteus y tampoco tienen su código SPICE²⁷ para poder ser simulados, se tuvo que reemplazar por otros dispositivos que tuvieran características semejantes.

En la simulación, las señales de magnitud de corriente y voltaje son representadas por circuitos independientes, mientras que las señales de fase se obtienen por medio de generadores autónomos de señal cuadrada. Luego son combinadas por una compuerta lógica XOR con el objetivo de determinar el desfase entre estas y así proceder al cálculo del tiempo de ancho de pulso (desfase), para así calcular el factor de potencia y por último la energía eléctrica (Esto es explicado más adelante en el documento).

La cronología de la simulación es la siguiente:

- El primer bloque de diseño fue la fuente de alimentación

El transformador utilizado en ISIS es el TRANS-2P3S que tiene derivación central. Para poder simular el transformador se ocupó la siguiente formula

$$TSI = \frac{0.5}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2}$$

Donde TSI es la inductancia total del secundario, que está en función de n_1 que representa el voltaje de entrada y n_2 el voltaje salida, y como se sabe la tensión

²⁷ Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis (Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados) Es un estándar internacional cuyo objetivo es simular circuitos electrónicos analógicos.

de la red idealmente es $n_1 = 120 \text{ V}$. Como el voltaje de secundario deseado era 16 V , se obtuvo un $TSI = 0.035 \text{ H}$. En la figura 27 se aprecia la configuración del transformador.

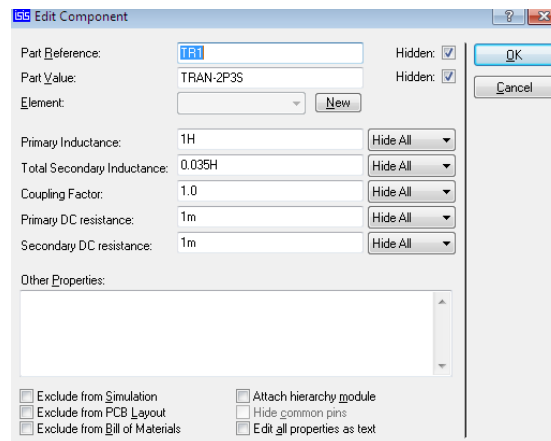


Figura 27: Configuración del transformador TRAN-2P3S

Posteriormente al proceso de rectificación conformado por puente rectificador de onda completa, llamado BRIDGE; se procedió al cálculo del filtro por medio de la fórmula siguiente

$$C = \frac{I_{DC}}{V_r * f}$$

Donde I_{DC} es la corriente DC a la salida del diodo puente-rectificador.

V_r ; el voltaje de rizado.

Y f ; la frecuencia.

Por teoría se conoce que el voltaje de rizo es 5% el V_{DC} , es decir;

$$V_r = 0.05 * 16 = 0.8 \text{ V}.$$

Se supuso (sumando todas las cargas) una corriente de salida de 100 mA ; y como se conoce la frecuencia de la red en Nicaragua es 60 Hz .

Resultando:

$$C = \frac{I_{DC}}{V_r * f} = \frac{100 \text{ mA}}{4\sqrt{3} * 0.8 \text{ V} * 60 \text{ A}} = 300.70 \mu F$$

Como comercialmente no existe un valor de capacitor igual a $300.70 \mu F$ se decidió utilizar dos capacitores electrolíticos con valor de $470 \mu F$, los cuales en paralelo con capacitores de 2.2 nF estabilizan el voltaje a la entrada de los reguladores de voltaje.

Paso seguido se seleccionaron los integrados que permiten las dos salidas de alimentación.

- ❖ El LM7805 para la salida de alimentación positiva V_{cc} .
- ❖ El LM7905 para la salida de alimentación positiva V_{ee} .

A estos integrados se les añadió unos diodos de propósito general 1N4007 entre las entradas y las salidas, más una red de capacitores electrolíticos de $22 \mu F$ en paralelo con capacitores cerámicos 2.2 nF , con la finalidad de fijar el voltaje de salida y garantizar una variación mínima, ya que este voltaje es la alimentación de todo los dispositivos que conforman el medidor de energía.

En la figura () se puede apreciar que los voltímetros de entrada indican que entre cada red existen 21.5 V , por lo tanto hay 43 V después del puente rectificador y a la salida se observan los $+5.01 \text{ V}$ del voltaje positivo y los -5.03 V para el voltaje negativo. La variación de unos mV se debe a la tolerancia de los reguladores de voltaje, pero al final la tensión de salida de la fuente permanece constante gracias al circuito de regulación compuesto con capacitores tanto electrolíticos como cerámicos, así como diodos de protección entre la entrada y

salida de los dispositivos reguladores que permiten que al haber cambios bruscos en el valor de tensión nominal la salida se mantenga invariable.

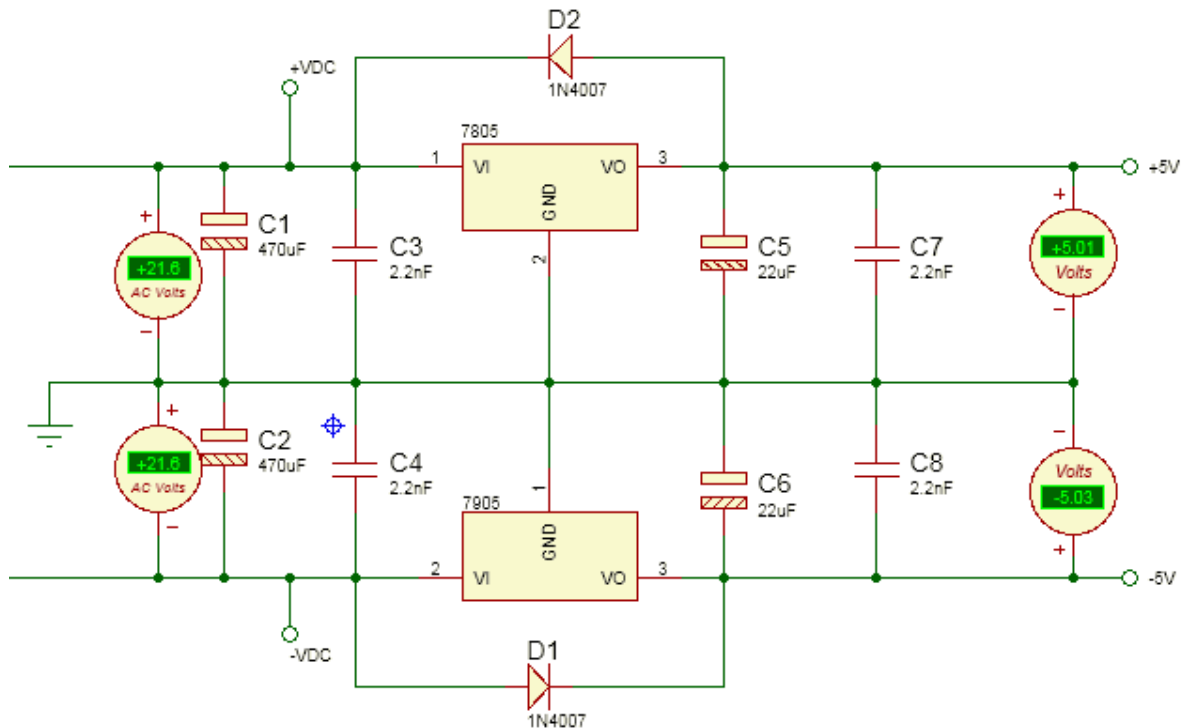


Figura 28: Circuito de regulación de voltaje

Un anexo de esta etapa es el circuito de indicación que consta de un diodo led con el propósito de señalar que la fuente está encendida (cuando la fuente está en funcionamiento) y led apagado (cuando está inactiva).

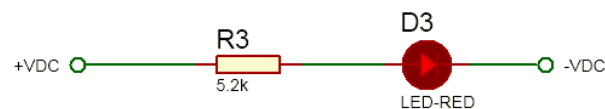


Figura 29: Circuito de indicación de fuente activa/inactiva

En la figura 30 se pueden apreciar las señales de diferentes segmentos de la fuente de alimentación:

- ❖ La señal en amarillo simboliza la señal de la red, el voltaje de entrada $AC = 170\text{ V}$ (En el simulador se tiene que ajustar el voltaje pico, es decir $120\sqrt{2}$).
- ❖ La señal en azul es el voltaje a la salida del diodo puente rectificador de onda completa y representa el voltaje de rizo con un valor de 110 mV .
- ❖ La tercera señal (señal rosa) muestra los 3.60 VDC del circuito que indica la magnitud de tensión que va al microcontrolador.
- ❖ Y la cuarta señal permite visualizar los 5 VDC de la salida positiva de la fuente de alimentación.

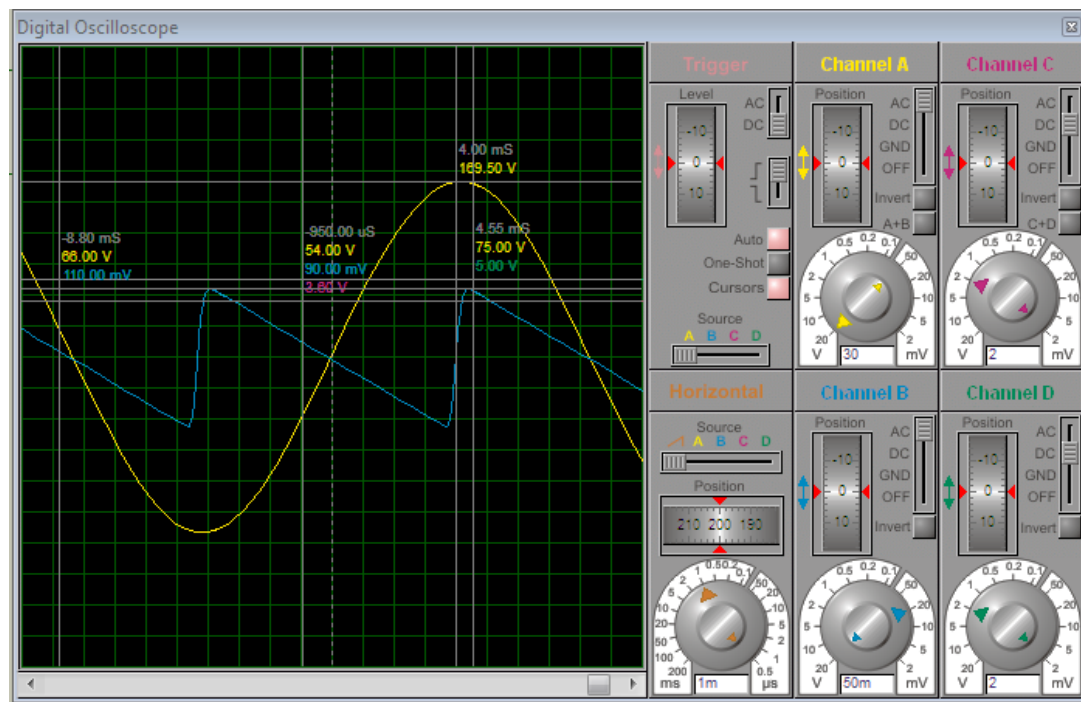


Figura 30: Señales de la fuente de alimentación

El diseño completo de la fuente de alimentación puede ser visto en (Figura 60-Anexos).

- El segundo bloque de diseño fue la adquisición de las señales de corriente y voltaje.

La representación de la **de la magnitud de la señal de tensión** se realizó por medio de un circuito divisor de voltaje proveniente de la salida del diodo puente rectificador. La representación del voltaje se plasmó de esta forma porque en Proteus cuando se combinan muchos componentes analógicos se encuentran problemas como *Simulation is not running in real time due to excessive CPU load*; fallos entre los códigos SPICE y tiempos de tamaño de paso muy pequeños (tiempos de simulación) (Figura 61-Anexos).

Como el $V_{DC} = 21.5 \text{ V}$ (Voltaje a la salida del diodo puente).

Se conoce por divisor de voltaje:

$$V_{out} = \frac{R_2}{(R_2 + R_1)} * V_{in} = \frac{2.4k\Omega}{(2.4k\Omega + 12k\Omega)} * 21.5 \text{ V} = 3.5833 \text{ V} \approx 3.59 \text{ V}$$

En la figura 31 se aprecian los 3.59 V que resultan del divisor de voltaje y representa la señal de magnitud de tensión.

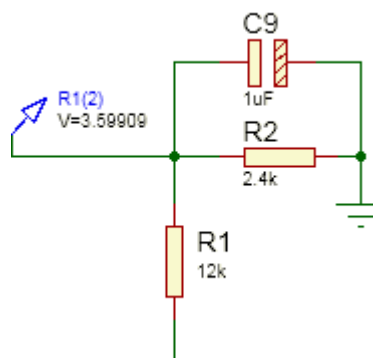


Figura 31 Divisor de voltaje que representa la magnitud de la señal de tensión

De modo que como se viene explicando, en el circuito completo no se puede presentar la representación de la señal de magnitud de voltaje a través de la red anterior, se sustituyó por un potenciómetro alimentado de $5 V_{CC}$ y ajustado hasta $3.6 V$, ya que a la hora de configurar el potenciómetro, este varía cada 0.5 dígitos.

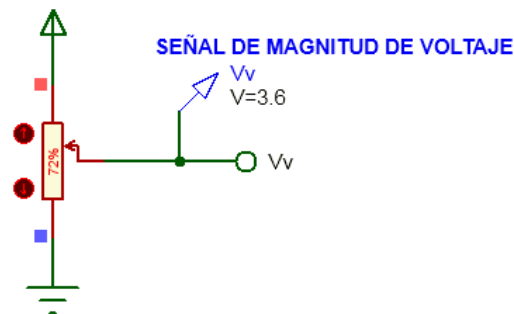


Figura 32: Representación de la señal de magnitud de voltaje en el ckto completo

Respecto a la programación del código de voltaje, es la más común, utilizada en los ejemplos de los libros para determinar el valor del ADC de un PIC, con la peculiaridad que en nuestro diseño se multiplica un valor (en este caso 33.33) que representa los $120 V$ de la línea cuando el potenciómetro este al 72% .

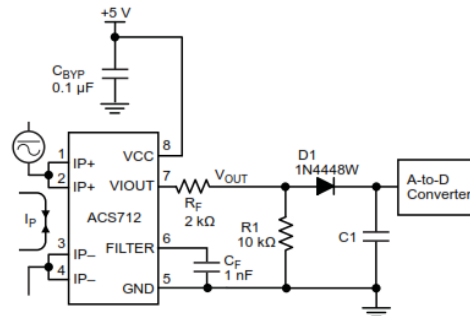
```
int16 v;
float p,q;

void voltage ()
{
    set_adc_channel(0); //Habilitación canal 0
    delay_us(20);
    v=read_adc(); //Lectura canal 0
    p=(5.0*v)/1024.0; //Conversión a tension
    q=p*33.3333;
}
```

Figura 33: Programación del canal de voltaje

La **magnitud de la señal de corriente** se efectuó mediante el sensor de corriente ACS712-20 A

La aplicación típica que se ejecutó es la mostrada en la figura 34, es una *Aplicación de voltaje de salida rectificado* a través del cual un voltaje de salida es inducido al convertidor análogo-digital de nuestro PIC.



Application 4. Rectified Output. 3.3 V scaling and rectification application for A-to-D converters. Replaces current transformer solutions with simpler ACS circuit. C1 is a function of the load resistance and filtering desired. R1 can be omitted if the full range is desired.

Figura 34: Aplicación de voltaje de salida rectificado

Para poder programar el sensor, es necesario conocer su curva característica (figura 35), la cual nos permite saber la ecuación de transferencia²⁸ que lo describe para así obtener la medición correcta.

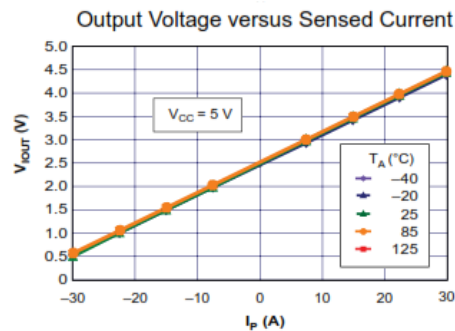


Figura 35: Curva característica del sensor ACS712

²⁸ Modelo matemático que describe la respuesta del sistema a través de una relación entre la señal de salida con respecto a la señal de entrada.

La grafica muestra una recta pendiente que nos indica la proporcionalidad del dispositivo de medición.

Se conoce que la ecuación de una pendiente es $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$. Donde el eje y representa el voltaje, el eje x representa la corriente y la pendiente m representa la sensibilidad del sensor.

De la hoja de datos del sensor se sabe que:

- Para $0A = \frac{v_{cc}}{2} = 2.5 V$ o 512 conteos análogos (ADC)
- Sensibilidad= 100 mV/A para sensor 20 A.
- Para $20 A \rightarrow V_{in} = 2.5 + (100 \text{ mV/A} \times 20 A)$.
- Para $-20 A \rightarrow V_{in} = 2.5 - (100 \text{ mV/A} \times 20 A)$.

Lo que nos dice que el voltaje de entrada es descrito por la ecuación

$$V_{in} = \frac{v_{cc}}{2} + 0.1 * I$$

Y que la corriente a calcular es expresada por

$$I = \frac{V_{in} - \frac{v_{cc}}{2}}{0.1}$$

Conociendo la ecuación característica se procedió a la programación del código.

Se tuvo que ajustar por medio de código el voltaje de salida del sensor ya que el circuito de acondicionamiento compuesto por las resistencias R2 y R3, el diodo D1 y el capacitor C2 provocan un offset de la señal de salida, puesto que al valor normalizado en el ADC (outputvoltage) se le resto 1.8 unidades y no $2.5 \left(\frac{v_{cc}}{2}\right)$ según lo indica la hoja de datos del ACS712.

```
int16 reading;
float outputvoltage,current;

void main()
{
    set_tris_a(0xFF);

    setup_adc_ports(AN0);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

    lcd_init();

    while (TRUE)
    {
        set_adc_channel(0);
        delay_us(20);
        reading=read_adc();
        outputvoltage=(5.0*reading)/1023.0;
        current=(outputvoltage-1.8)/0.1; //Adquisicion de corriente (según datasheet) *Current=(OutputSensorVoltage - 2.5)/0.1

        lcd_gotoxy(1,1);
        printf (lcd_putc, "ADC=%4lu",reading);
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf (lcd_putc, "Voltage=%02.2fV",outputvoltage);
        lcd_gotoxy(1,3);
        printf (lcd_putc, "Current=%02.2fA",current);
        delay_ms(500);
    }
}
```

Figura 36: Programación del sensor ACS712-20 A

Basándose en la aplicación descrita anteriormente (*Voltaje de salida rectificado*) se colocó un resistor de $12\ \Omega$ para lograr una corriente de 10 A como se observa en la figura 24. Las señales A y B del osciloscopio se muestran en la figura (62-anexos) que detallan los 170 Vrms (120 VAC) de la fuente AC y los 2.5 VAC a la salida del sensor. El capacitor C2 de $1\ \mu\text{F}$ se usa como filtro para disminuir el rizo del voltaje de salida. Dicho voltaje es el que entra al canal 1 del ADC del PIC.

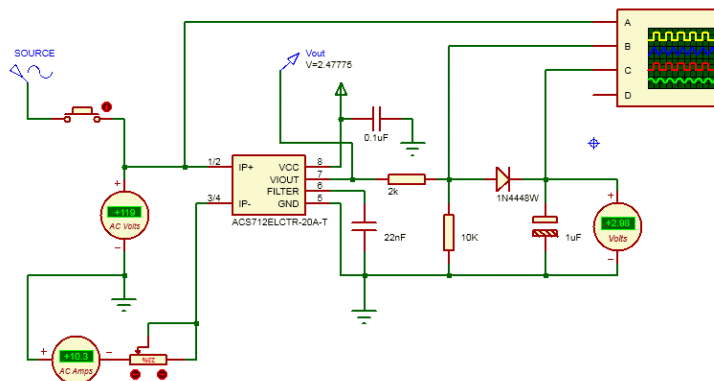


Figura 37: Simulación del sensor ACS712-20 A

El problema que surgió con esta aplicación es que a medida que la medición de corriente iba incrementando igualmente el error, esto puesto que el sensor de corriente tiene un offset de 2.5 VAC al circular corriente por el dispositivo, así que para corregir este error se tuvo que diseñar una aplicación basada en un **corrector- amplificador de corriente**.

El primer amplificador operacional se encarga de eliminar el offset de 2.5 V por medio de un divisor de voltaje compuesto por resistores de 10 K Ω en la patilla inversora, esto produce un voltaje de salida sobre el eje 0, es decir ajustado. El segundo amplificador es un rectificador de onda completa y el tercer amplificador es el responsable de amplificar la señal proveniente del rectificador y a través de la red de resistores R8, R9 y R10 y el capacitor C3 suministran un voltaje de DC constante proporcional a la corriente medida.

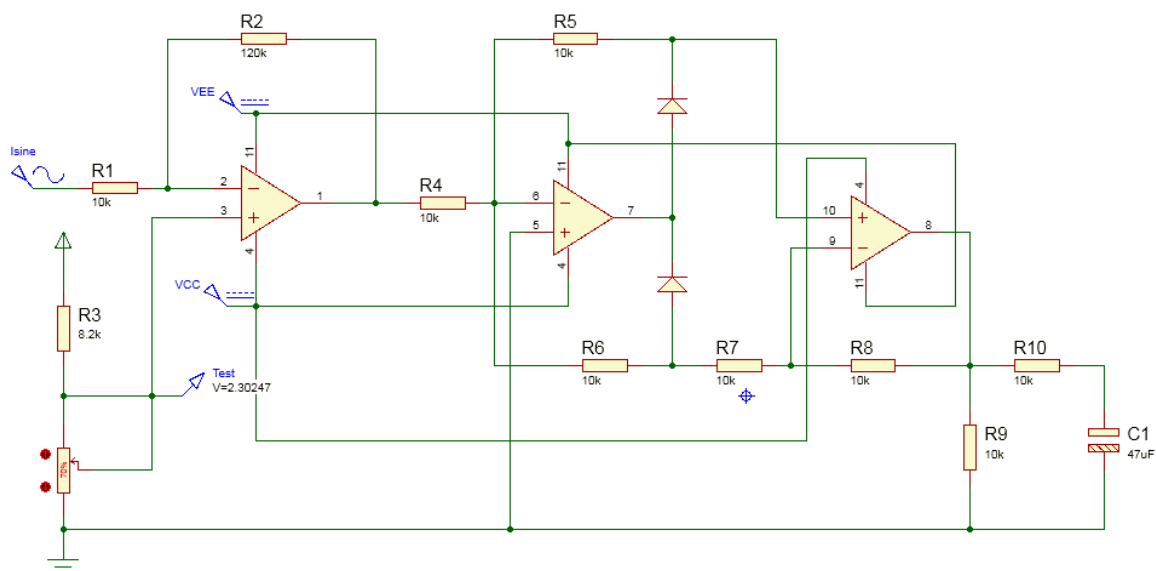


Figura 38: Circuito corrector-amplificador de corriente

A través de la figura 39, podemos ver las señales a la salida de las diferentes etapas del circuito corrector- amplificador de corriente.

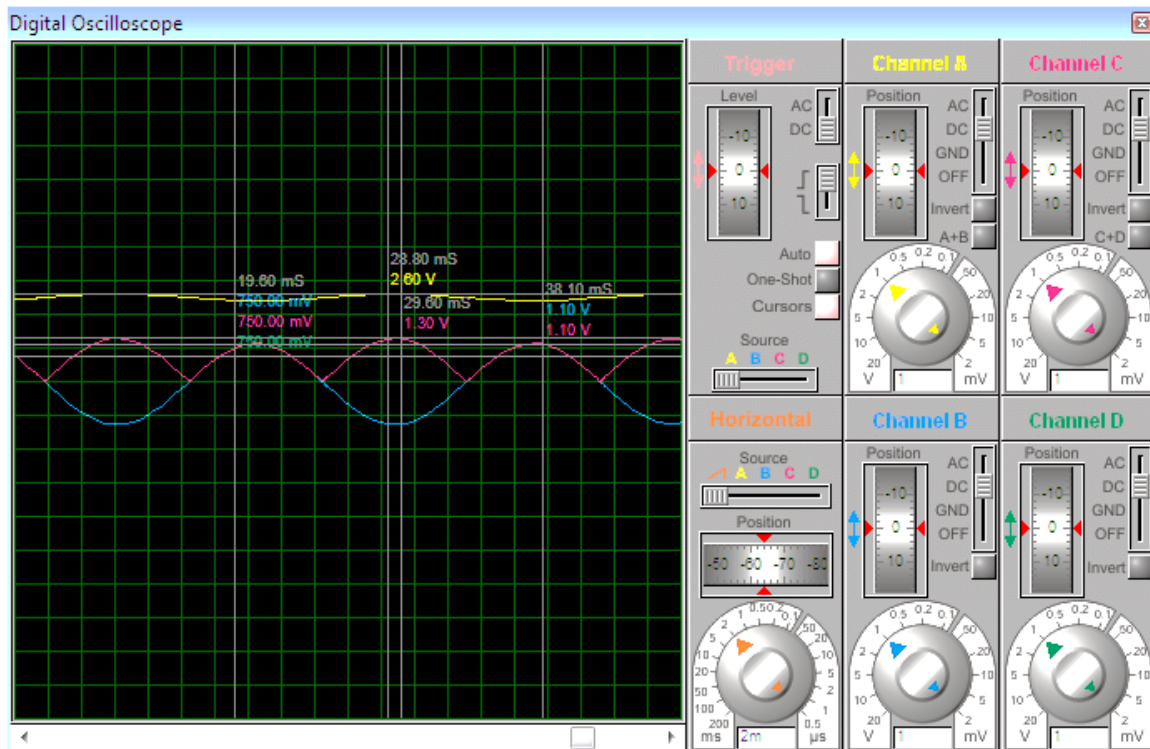


Figura 39: Señales del circuito de corrección-amplificación de corriente

- La señal en amarillo representa la salida del sensor de corriente con un offset de aproximadamente 2.6 V.
- Por medio de la señal azul se muestra la señal corregida (sin offset) con una magnitud de 1.6 V.
- A través de la señal en rojo se aprecia la salida del amplificador-rectificador de onda completa.
- La señal en verde es una señal DC aproximadamente de 750 mV que según el circuito simulado representa la corriente medida.

Para la **representación de las señales de fase del voltaje y la corriente** se precisa cambiar las formas de onda de las señales, convirtiéndolas en señales cuadradas ya que es la manera correcta de determinar su diferencia de fase (la diferencia en grado de ambas señales)

Estas señales brindan información acerca del factor de potencia del sistema. Esto debido a que al calcular el tiempo de subida de cada señal obtiene el desfase en tiempo de ambas señales, y por lo tanto su desfase en grado. La siguiente figura permite relacionar ambos tipos de desfases.

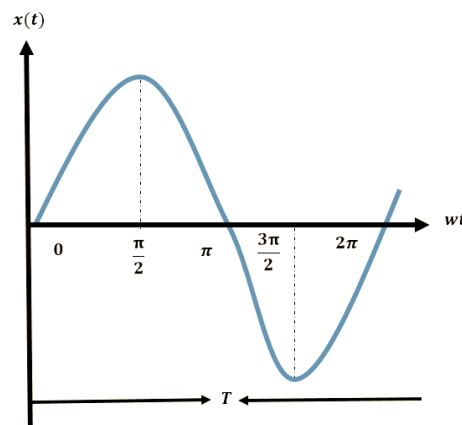


Figura 40: Representación de una señal senoidal

Una señal senoidal equivale a 2π ; es decir 360° . Convirtiendo esto a tiempo tenemos que

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Y como

$$T = \frac{1}{f}$$

Entonces

$$T = \frac{1}{60} = 16.667 \text{ ms}$$

Pero como solo interesa la parte positiva del período entonces

$$\frac{T}{2} = 8.33 \text{ ms}$$

De manera que si

$$\pi = 8.33 \text{ ms}$$

Y

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \cos \varphi \Rightarrow F_p$$

Entonces a través de la siguiente ecuación, podremos calcular el factor de potencia del sistema

$$8.33 \text{ ms} \rightarrow 180^\circ$$

$$\Delta t \rightarrow x$$

Y así dependiendo del valor del desfase, se encuentra el ángulo y se le aplica el coseno para posteriormente determinar el factor de potencia.

Los circuitos comparadores de fase están diseñados a base de amplificadores operacionales (OPAMPs).

La señal de fase de voltaje se adquirió de una de las patillas de señal AC del puente diodo rectificador y por medio de un resistor de $39\text{ k}\Omega$ se disminuyó la tensión a 3.25 V . El OPAMP utilizado se trata de un LM393 que un chip de baja potencia y bajo nivel de offset que consta de dos comparadores. La alimentación es $V_{CC} = 5\text{ V}$ y $V_{EE} = -5\text{ V}$, la red de resistores tanto en la patilla inversora, como no inversora, así como la retroalimentación es de $10\text{ k}\Omega$ y, esto con la finalidad de que la tensión de salida proporcionará como resultado una onda cuadrada de $5\text{ V}_{\text{máx}}$ como la mostrada en la figura 41.

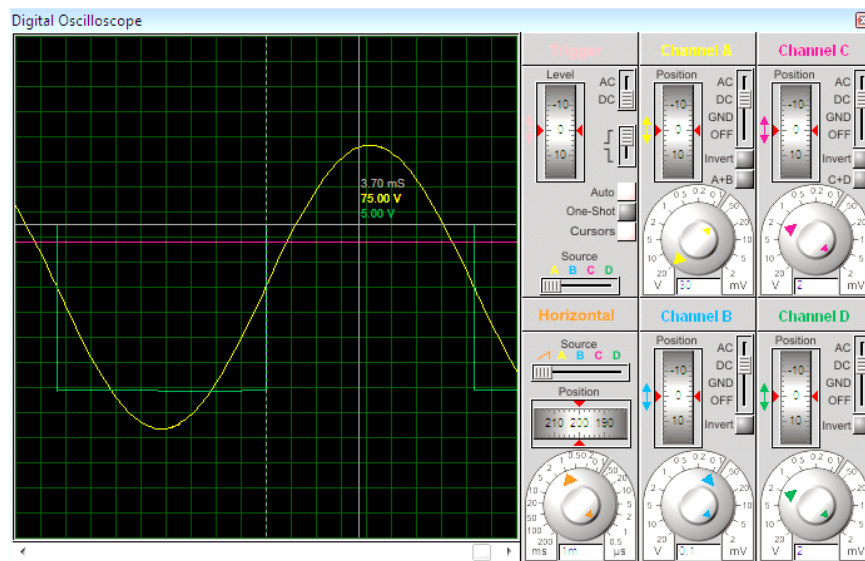


Figura 41: Onda cuadrada de la señal de fase del voltaje

En la (Figura 63-Anexos) se puede apreciar el circuito comparador de fase de la señal de voltaje.

Con respecto a la señal de fase de la corriente también se utilizó el mismo amplificador operacional y la misma configuración de red de resistores para que resultará la misma onda cuadrada de 5 $V_{m\acute{a}x}$.

La figura 42 nos permite visualizar la onda cuadrada de la señal de fase de corriente.

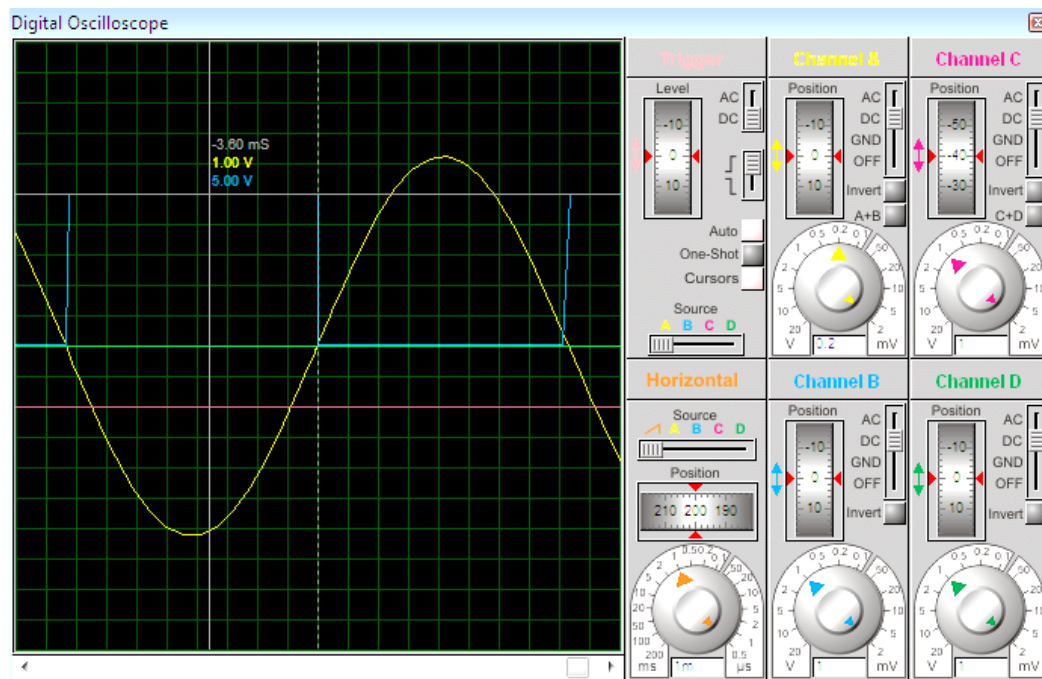


Figura 42: Onda cuadrada de la señal de fase de la corriente

A través de la (Figura 64-Anexos) se ejemplifica el circuito para la fase de la señal de corriente.

Pero debido a lo explicado anteriormente, que la combinación de circuitos analógicos y digitales provoca redundancia en ISIS Proteus, no se logró demostrar

en conjunto la simulación de las señales de fase, solo independiente entonces se desarrolló un circuito sencillo mediante generadores de pulsos que el simulador contiene

La representación de las señales de fase independientes, puede observarse a continuación. (Figura 43).

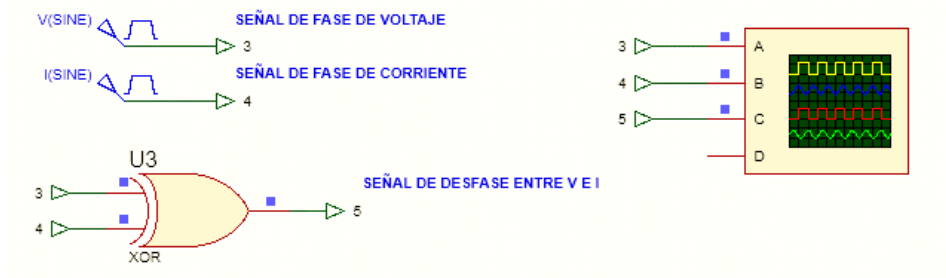


Figura 43: Generadores de pulso para las señales fase de corriente y voltaje

Dichos generadores se configuran de la siguiente manera (ver Figura 65-Anexos):

Generador de pulso 1

- El voltaje del pulso en alto $\rightarrow 5$ V.
- El tiempo de inicio de pulso $\rightarrow 0$ ms²⁹.
- El tiempo de subida del pulso $\rightarrow 500$ ns.
- El tiempo de bajada del pulso $\rightarrow 500$ ns.
- El ancho de pulso $\rightarrow 50\%$.
- La frecuencia $\rightarrow 60$.

Generador de pulso 2

- El voltaje del pulso en alto $\rightarrow 5$ V.

²⁹ ms (mili-segundos).

- El tiempo de inicio de pulso $\rightarrow 2.08 \text{ ms}$.
- El tiempo de subida del pulso $\rightarrow 500 \text{ ns}$.
- El tiempo de bajada del pulso $\rightarrow 500 \text{ ns}$.
- El ancho de pulso $\rightarrow 50\%$.
- La frecuencia $\rightarrow 60$.

El segundo generador de pulso es configurado de forma que exista un desfase de 2.08 ms con el propósito de crear una divergencia entre las señales de fase, para representar lo que en la vida real sucede, al existir en cada sistema monofásico una separación entre las fases de V e I.

Esta diferencia de 2.08 ms indica que el desfase es de 45° entre señales, esto es explicado de tal manera que:

- Si la frecuencia de la red es 60 Hz $\rightarrow \pi = 360^\circ \rightarrow T = 16.6666 \dots 7 \text{ ms}$

$$\text{Entonces } \frac{\pi}{4} = 45^\circ = 2.08 \text{ ms}$$

De modo que era necesario calcular mediante el código del programa este desfase, usando los módulos de captura (CCP) del PIC. Esta diferencia de fase es de suma importancia ya que por medio de ella se determina tanto el factor de potencia del circuito como la potencia activa, y por consiguiente la energía activa del proyecto que al final es la variable principal.

Existen interminables maneras de encontrar dicho desfase, pero se recurrió a la más sencilla, la cual consiste en introducir las señales por una compuerta XOR (ver tabla 8-tabla de verdad).

Entrada	Entrada	Salida
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

Tabla 7: Tabla de verdad de una compuerta XOR

La función de dicha compuerta es permitir que solo pasen los pulsos positivos y se eliminen los pulsos negativos, en otras palabras, encontrar la diferencia entre el pulso de subida de la señal de corriente (desfasada 2.08 ms respecto al voltaje) y el pulso de subida de la señal de voltaje. De esta manera la señal cuadrada de salida resultante al pasar las señales a través de la XOR determina el ancho de pulso y con esto el período el tiempo de desfase en ms (Δt).

En la programación, se tiene que configurar las funciones de interrupción de captura (CCP³⁰) del PIC globalmente, está permite detectar primero cuando existe un flanco de subida y luego en el momento que sucede un flanco de bajada tal como se presenta en la figura 44.

```

////////////////////////////////////////Funcion para captura del tiempo de ancho de pulso-modulo(CCP)////////////////////////////////////////
#INT_CCP1
void ccp1_int()                                //Funcion de interrupcion
{
    if(cambio==0)                               //Flanco de subida
    {
        TFS=CCP_1;                             //Carga del valor del registro CCP1 en flanco de subida
        setup_ccp1(CCP_CAPTURE_FE);             //Configuracion modo de captura en flanco de bajada
        cambio=1;                               //Control de cambio de flanco
    }
    else
    {
        TFB=CCP_1;                             //Carga del valor del registro CCP1 en flanco de bajada
        setup_ccp1(CCP_CAPTURE_RE);             //Configuracion modo de captura en flanco de subida
        cambio=0;                               //Control de cambio de flanco
    }

    if(nuevo_pulso==0){                         //Fin de pulso
        nuevo_pulso=1;                         //Pulso a medir
    }
}
////////////////////////////////////////

```

Figura 44: Configuración del módulo CCP del PIC (flanco de subida y flanco de bajada)

³⁰ (Capture-Compare-PWM) módulo del PIC utilizado con objetivos de comparación, captura y PWM.

Posteriormente CCP se configura dentro de la función main para que pueda ser reconocida al compilar el software.

```

setup_timer_1(T1_INTERNAL);           //Configuro TIMER 1
setup_ccp1(CCP_CAPTURE_RE);          //Configuracion modo de captura en flanco de subida
cambio=0;                             //Habilitacion interrupcion modulo CCP
enable_interrupts(INT_CCP1);
enable_interrupts(GLOBAL);

```

Figura 45: Declaración del módulo CCP dentro de la función principal

Para finalizar la configuración se procede a la realización de la función para calcular el ancho de pulso, resultando:

```

while(TRUE)
{
    if(nuevo_pulso==1) {                //¿Nuevo Pulso?
        TF=(TFB-TFS);                  //Ancho de pulso(desfase entre señales)
        AP=TF*1.0;
        t=AP/1000000; // dividido entre 1000000 para obtener valor en ms
        ///////////////////////////////////////////////////360°=16.667ms//180°=8.33ms//////////////////////////////////////
        /////////////////////////////////////////////////// Como t=2.08ms(0.00208)//////////////////////////////////////
        /////////////////////////////////////////////////// //conv=(t*180)/8.33ms(0.00833);=44.945978=45°;es decir PI/4////////////////////////////////
        ///////////////////////////////////////////////////P(Potencia Activa);//////////////////////////////////////
        conv=((t*180)/0.00833); //Conversion a grados
        rad=(conv*PI)/180;             //Conversion a radianes
        val=cos(rad);                  //Formula para obtener factor de potencia--coseno de xxx// (conv) esta en radianes

        P=(120*60)*val;                //Formula de la Potencia Activa (P=S*cos(val)) val=angulo
        P=P/1000;
        nuevo_pulso=0;
    }
}

```

Figura 46: Función para el cálculo del ancho de pulso (desfase entre V e I)

La (Figura 66-Anexos) muestra el ancho de pulso (diferencia de fase) de la señal resultante coloreada en rosada.

- $Pulso_I$ (señal amarilla) – $Pulso_V$ (señal azul) = señal resultante

De esta manera se procedió al cálculo del factor de potencia del circuito. Se sabe que:

- $\Delta t \rightarrow (t_2 - t_1) \rightarrow \cos \varphi$; Donde $\varphi \rightarrow$ ancho de pulso
- Donde $t_2 \rightarrow$ valor del tiempo de inicio de la señal de fase de la corriente.
- Y $t_1 \rightarrow$ valor del tiempo de inicio de la señal de fase del voltaje.

En la figura 47 se muestra el código donde se calcula el factor de potencia. Como el valor del ancho de pulso resulta en ms, se tuvo que convertir el $\cos\varphi$ a grados y luego a radianes, ya que las funciones trigonométricas en el compilador CCS solo se ejecutan en radianes. Esto se realizó de la siguiente manera:

$$\text{conv}(\text{grados}) = \frac{\Delta t(\text{ms}) * 180}{8.33(\text{ms})}$$

Dando como resultado un valor en grados, ahora para convertir a radianes.

En este caso el desfase dio 2.08 ms lo que equivale a 45°

$$\text{rad} = \frac{\text{conv}(\text{grados}) * \pi}{180}$$

De forma que

$$F_p = \cos(\text{rad})$$

Y por lo tanto

$$P = S * \cos\varphi (\text{watt})$$

Donde S resulta de la multiplicación de las señales de magnitud del voltaje y la corriente

```
float S;  
  
void pot ()  
{  
    S=q*current;//Obtencion de la Potencia activa (S=V*I)  
}
```

Figura 47: Cálculo de la potencia aparente S (Volt-Amperios VA)

Y P


```
P=abs(S*FP);
```

```
///!Potencia Activa
```

Figura 48: Cálculo de la potencia activa P (Watt)

Por lo tanto:

$$E = P * t \text{ (kWh)}$$

Este caso es distintivo del diseño porque la energía activa mide tantos (x) kW por hora, de modo que para representar el incremento de energía se usó una variable que aumenta en una hora cada vez que se apreta un pulsador, multiplicándose con la potencia activa y representando así el consumo energético.

```
int8 n;
float j,P;

void energy()
{
  if((input(PIN_E0))&&(n<24))
  {
    n++;
    j=n*P;
    if(n==24)
    {
      n=0;
      j=0;
    }
  }
}
```

Figura 49: Cálculo de la energía activa

La variable n se incrementa cada vez que el pulsador es accionado hasta llegar al conteo máximo que es 24 que representa la hora máxima. La variable j se carga con el valor de n por la multiplicación de la potencia activa y así se obtiene el cálculo de energía activa.

- El segundo bloque de diseño consiste en la unión de las etapas de control y visualización. Esto debido a que estas dos secciones se conjuntan para llevar a cabo el procesamiento y lectura de datos.

Las señales provenientes de los canales 1 (voltaje) y 2 (corriente) se reciben a través de las entradas (pines) analógicas 2 (A_0) y 3 (A_1) del convertidor analógico digital del microcontrolador PIC 18F2525 (ver figura 50 para digitalizarlas y discretizarlas y obtener la magnitud correspondientes de dichas señales.

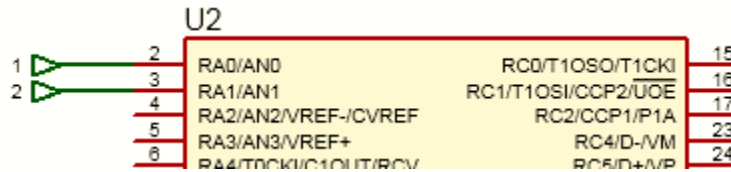


Figura 50: Entradas lógicas de las magnitudes de las señales de V e I en el PIC 18F2525

La señal de fase 5 resultante del ancho de pulso (diferencia entre señal de fase de corriente y señal de fase del voltaje) es direccionada al pin 17 (RC2/CCP1) del PIC.

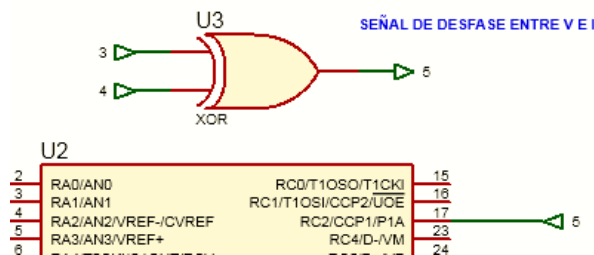


Figura 51: Entrada lógica del desfase entre las señales V e I en el PIC 18F2525

Se debe conectar el pin de resteo master clear (MCLR) tanto en la simulación como en la práctica para que el microcontrolador desarrolle sus funciones correctamente.

Consecutivamente a la conexión de las señales de fase y magnitud del voltaje y la corriente se procedió a la visualización de datos en la pantalla de cristal líquido. El LCD ocupado es el LM044I, que presenta 20 columnas por 4 filas. Se utilizó

este LCD debido a la cantidad de variables a leer, además de ocupar una sola fila para los datos proporcionados por el reloj de tiempo real.

Cabe destacar que en la simulación no es importante conectar los pines de alimentación (VSS y VDD), ni el pin de contraste (VEE), así como los pines desde D0 hasta D1. No obstante en la práctica es trascendental la debida conexión de estos pines. La conexión de pines desde el LCD al microcontrolador puede apreciarse en la (Figura 67-Anexos).

Se modificó la librería <LCD.C> que por defecto trae el compilador CCS por la librería <FlexLCD420B.C> con la siguiente asignación de pines:

```
#define LCD_DB4 PIN_B4
#define LCD_DB5 PIN_B5
#define LCD_DB6 PIN_B6
#define LCD_DB7 PIN_B7

#define LCD_RS PIN_B2
#define LCD_RW PIN_C0
#define LCD_E PIN_B3

/*
// To prove that the driver can be used with random
// pins, I also tested it with these pins:
#define LCD_DB4 PIN_D4
#define LCD_DB5 PIN_B1
#define LCD_DB6 PIN_C5
#define LCD_DB7 PIN_B5

#define LCD_RS PIN_E2
#define LCD_RW PIN_B2
#define LCD_E PIN_D6
*/
```

Figura 52: Modificación de la librería del LCD 20x4

- El tercer bloque de diseño estuvo a cargo del reloj de tiempo real DS1307

Este reloj es el encargado de brindar la fecha y el tiempo del circuito con el objetivo de cargar los datos en tiempo real.

En la simulación es necesario colocar resistores pull-up³¹ (4.7 kΩ) a los pines SDA (línea de datos), SCL (señal de reloj) y Sout (señal de salida) debido a sus salidas de drenador abierto para evitar cualquier redundancia en los niveles lógicos, que nos exista fuga de corriente en las líneas y por lo tanto no se dé redundancia de información; esto ya que el protocolo de comunicación que este dispositivo utiliza es el I²C, es decir la transferencia de datos es bidireccional (transmisión o recepción).

Cabe destacar que el DS1307 debe de ir acompañado de un oscilador de cristal de 32.768 KHz; sin embargo en la simulación no es necesario conectarle dicho cristal pero por cuestiones de formalidad se le agrego el reloj de cuarzo.

Las conexiones entre el reloj y el PIC se desarrollaron de la siguiente manera:

- SDA (pin 5 del reloj) con RC6/TX/CK (pin 25 del PIC).
- SCL (pin 6 del reloj) con RC7/RX/DT/SDO (pin 26 del PIC).
- SOUT (pin 7 del reloj) con RB0/AN12/INT0/FLT0/SDI/SDA (pin 33 del PIC).

Como puede verse el pin de salida del RTC está conectado al pin RB0, temporizador 0 del PIC con el fin de ajustar el tiempo de reloj por una interrupción cada segundo. Esto se detalla a continuación:

La fórmula del Timer 0 es

$$Tmr0 = 65536 - clk / (frec * 4 * Preescaler)$$

Se configuró el preescaler del PIC con RTCC_DIV64 y con un oscilador de cristal de 4 MHz se obtuvo:

³¹ Los resistores pull-up tienen la misión de que las entradas lógicas del sistema se mantengan en los niveles correctos en caso de que otros dispositivos o circuitos se conecten o desconecten del sistema.

$$Tmr0 = 65536 - 4000000/(1 * 4 * 64)$$

$$Tmr0 = 65536 - 15,625$$

$$Tmr0 = \mathbf{49911}$$

El valor del timer es de **49911** (0xC2F7) hex; lo que significa que de esta manera se tendría una interrupción cada segundo.

```
#int_timer0
void timer0interrupt()
{
    clear_interrupt(INT_RTCC);
    cont++;
    if(cont==10)
    {
        cont=0;
    }

    set_timer0(49911);
}
```

Figura 53: Ajuste del timer a una interrupción cada segundo

Paso seguido al seteo del timer era necesario realizar una función que permitiera configurar manualmente las variables de fecha y tiempo.

Se creó una librería para el reloj de tiempo real (Ver Figura 68-Anexos) que realiza las siguientes acciones.

Los *LOGGICTOGGLE*³² (figura 54) son los responsables de ajustar la fecha y el tiempo del reloj de tiempo real.

- El probador lógico a la entrada RA3 se encarga de incrementar las variables de tiempo (hora, minutos, segundos) una vez alcanzado el menú de configuración.

³² Pulsador lógico (representado en forma triangular-color azul).

- El probador lógico a la entrada de RA4 es el responsable de decrementar las variables de tiempo (hora, minutos, segundos) una vez alcanzado el menú de configuración.
- El probador lógico a la entrada del temporizador 1 (RB1) además de actuar como interrupción externa tiene dos funciones:
 1. Una vez iniciada la visualización de datos en la LCD, si el probador no es accionado por primera vez, entonces el microcontrolador espera a que finalice la lectura de la primera cadena de texto para luego mostrar el menú principal con las variables medidas, de modo que la fecha y el tiempo no pueden ser ajustadas y en la pantalla se van a mostrar los datos pero con la hora desactualizada.
 2. Si el probador fue oprimido por primera vez entonces el microcontrolador permite entrar en el menú de configuración de fecha y hora, de manera que al ser accionado cada vez cambia entre las variables medidas hasta llegar al ajuste del año (fecha) para posteriormente mostrar los datos actualizados a través de la pantalla de cristal líquido

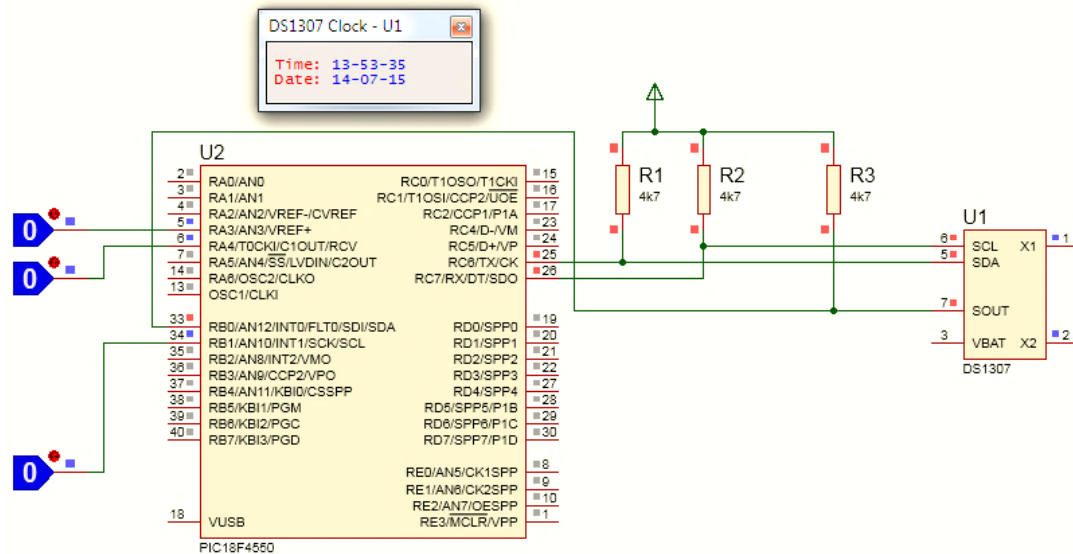


Figura 54: Diagrama del RTC-DS1307

En la (Figura 69-Anexos) se detalla este procedimiento paso a paso.

- El cuarto bloque diseño fue la simulación de la memoria de almacenamiento SD Card.

Esta tarjeta de memoria es la responsable de salvar los datos almacenados por el dispositivo medidor de energía

Se utilizó la MMC que por defecto viene integrada en PROTEUS. La conexión de la MMC con el PIC fue la siguiente:

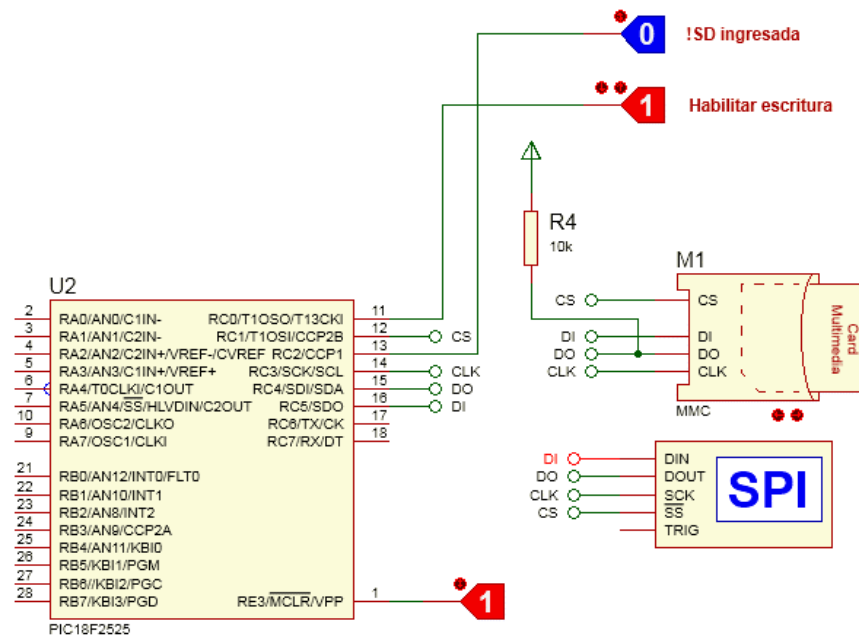


Figura 55: Conexión de la memoria MMC con PIC 18F2525

En la figura anterior pueden apreciarse las cuatro líneas de comunicación del protocolo SPI con las conexiones:

- Pin RC1 del PIC con pin CS de la MMC.
- Pin SCL del PIC con pin CLK de la MMC.
- Pin SDA del PIC con pin DO de la MMC.
- Pin SDO del PIC con pin DI de la MMC.

También se puede apreciar el debug SPI que permite visualizar las direcciones de memoria donde se están almacenando los datos. Así como las operaciones de lectura y escritura.

El diseño con la MMC tiene la peculiaridad de que los datos almacenados puedan ser visualizados en un archivo .csv; es decir un formato de archivo con valores separados por comas y el programa que se determinó para cargar estos valores fue Microsoft Excel® puesto que esta aplicación admite hojas de cálculo con las

que se puede llevar un registro de la fecha y la hora de las mediciones realizadas. Para este proceso la memoria trabaja en conjunto con el RTC DS1307.

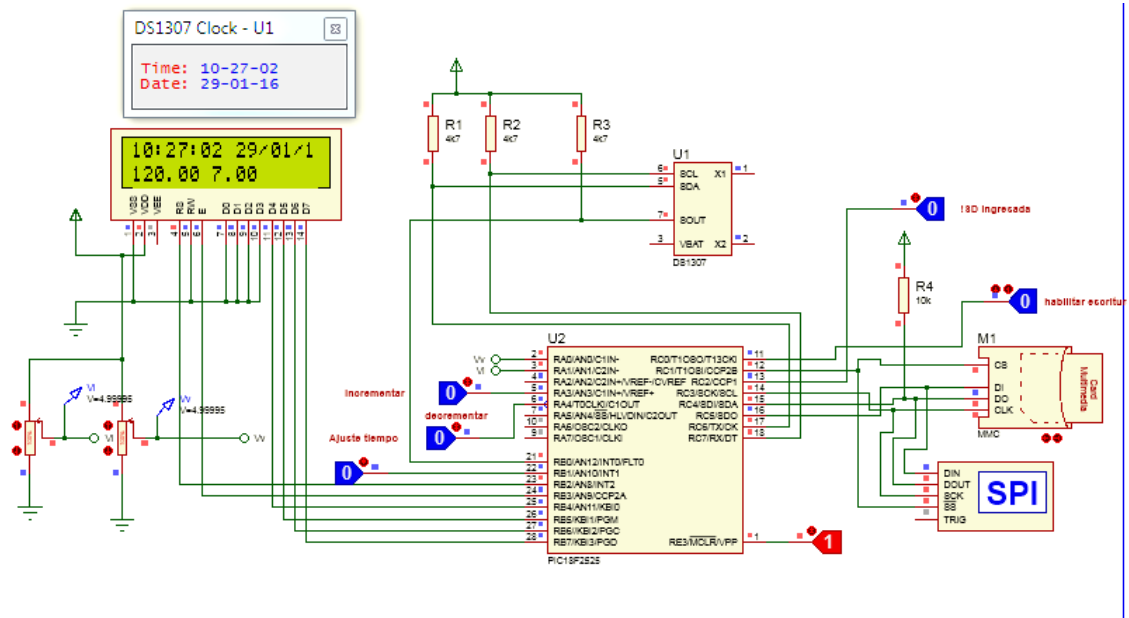


Figura 56: Conexión entre el PIC, la MMC y el DS1307

En la figura 56 se aprecia la conexión entre la memoria, el PIC y el reloj de tiempo real; la unión entre ellos permite configurar la fecha y la hora del almacenamiento de energía.

Se observan los tres push buttons donde se setea la fecha y la hora (incrementar, decrementar y ajuste de tiempo), así como los pulsadores que permiten que accionan la verificación y habilitación de la MMC (SD ingresada, habilitar escritura).

Al pulsar el botón habilitar escritura la MMC comienza a almacenar los datos, y estos son visualizados por medio del SPI debugger, tal como en la figura 57.

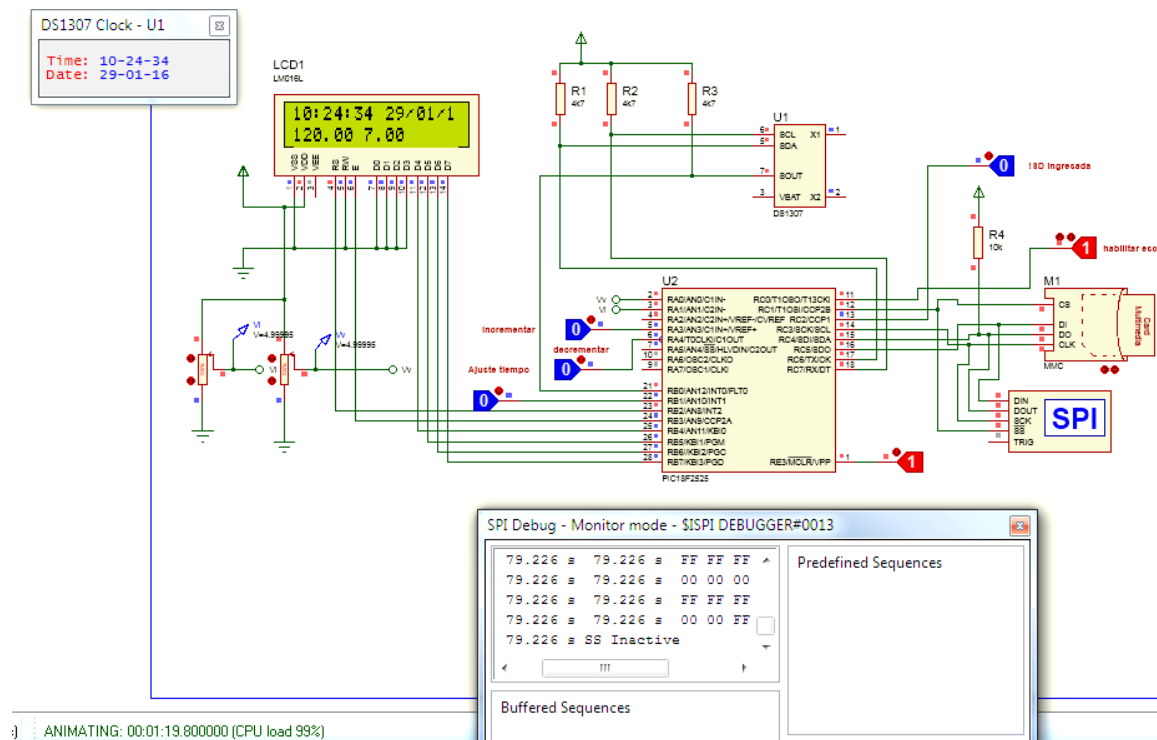


Figura 57: Memoria habilitada y operación de escritura

Es importante destacar que la memoria necesita cargar un archivo imagen, de modo que es indispensable utilizar un software que pueda crear carpetas con extensión .ima. En nuestro caso se ha usado PowerIso®. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se abre el programa y se crea una. nueva carpeta.
- Se selecciona un archivo llamado *Hard Disk Image*

- Se configuran las propiedades como: tamaño (varía dependiendo de la capacidad de almacenamiento de nuestro proyecto), tipo de sistemas de archivos (FAT 16) y el tamaño del clúster (generalmente 512 bytes).
- Se guarda la carpeta con nombre que determinemos en la carpeta donde se encuentra el código y la simulación del proyecto.

Acto seguido se carga la carpeta guardada en la MMC de ISIS y se compila el código.

Para que la compilación sea la correcta, en el código se tienen que especificar varios detalles.

Lo primero que se debe hacer es utilizar la librería FAT16.h. Este es el sistema de archivos predeterminado para trabajar con tarjetas de memoria, consiste en una tabla de asignación de archivos mediante la cual se crea una lista de contenidos de archivos donde se van almacenando datos en clústeres³³ mediante filas y columnas. El tamaño de clúster por defecto es 512 bytes.

Para que la librería FAT16.h funcione debidamente, se necesitan dos librerías más:

- SDCardSPI.h: A su vez necesita la librería HardwareSPI.h que permite realizar las modificaciones respecto al control del módulo SPI del microcontrolador.

³³ Es un conjunto de sectores contiguos que componen la unidad más pequeña de un dispositivo de almacenamiento de información.

- Y GenericTypeDefs.h: En la cual se definen el tipo de variables a utilizar [22].

Luego de haber incluido las librerías, se procede a declarar variables: tamaño de archivo, dirección de carpeta donde almacenar, tamaño de clúster padre, tamaño y nombre largo y corto para carpetas y archivos.

```
//Variables globales para manejo sd card
UINT8 Texto[512]="ENERGYMETER\r\nFECHA,HORA,Volt,Curr\r\n";
char Texto2[512]="";
int32 SectFound=0, FSizeFile=0;
    int16 FAddDir=0;
    int16 Fnclus=0,NCLUS=0;

//Para carpetas
char NombreCorto[13];
char NombreLargo[30];
//Para archivos
char NombreCorto1[13];
char NombreLargo1[30];

UINT16 UbicacionFolder=0;
char SFN[18]="";
```

Figura 58: Declaración de variables para uso de la MMC

La función que detecta si la SD Card fue ingresada es SD_DETEC, si es detectada, se inicializa y comienza el proceso de escritura, posteriormente se crea el archivo .csv y se guarda en la carpeta correspondiente, sino fue detectada comienza un ciclo infinito hasta el momento que sea verificada. El código de programación donde se detalla este proceso puede ser visualizado en la (Figura 70-Anexos).

Para finalizar esta etapa los datos se almacenan en la carpeta imagen y se abre para mostrar la información en Excel.

	A	B	C	D	E	F
1	ENERGYMETER					
2	FECHA	HORA	Volt	Curr	Pot	Energy
3	29/01/2016	10:12:34	120	7	0.594 Kw	0.165 w/s
4	29/01/2016	10:12:44	83.98	4.83	0.286 Kw	0.079 w/s

Figura 59: Datos almacenados en hoja de cálculo de Excel

Posteriormente se simuló el circuito completo por medio de una interfaz final reemplazando el sensor de corriente y la etapa del transductor de voltaje por simples potenciómetros, éstos operan de manera que al variar su magnitud cada unidad varíe por lo tanto su valor en el ADC del PIC para mostrar el valor correspondiente en el LCD.

La representación de la energía activa se realizó a través de un push buttons conectado al pin 8 (RE0/AN5/CK1SPP) del PIC. Cada vez que el botón se acciona, en el LCD se incrementa la hora y la Energía activa según como este programado el código. (Ver Figura 71-Anexos).

La programación de esta interfaz final se hizo por medio de librerías, lo que permite ocupar menos líneas de código y por ende menos memoria RAM del PIC, además que ayuda a la presentación y estética del proyecto La simulación de la interfaz final sin la etapa de almacenamiento puede observarse en la (Figura 72-Anexos). En el diseño se aprecian las seis variables (Voltaje, corriente, potencia aparente, factor de potencia, potencia activa y energía activa) que caracterizan del prototipo medidor de energía con su respectiva fecha y tiempo actualizado.

VI. COSTO DEL PROTOTIPO DE MEDICIÓN Y MONITOREO DE ENERGÍA

DISPOSITIVOS PRINCIPALES Y SUS COSTOS			
	Costo (\$) por unidad (sin impuestos)	Costo total (\$)	
Dispositivo			
Sensor de corriente ACS712 (2)	3.79	7.58	
Pantalla de cristal líquido LCD 20X4	11.35	11.35	
Reloj de Tiempo Real DS1307	6.75	6.75	
Microcontrolador PIC 18F2525	6.41	12.82	
MMC/SD Card Module Mikroelektronika	27	27	
Total		65.5	
OTROS DISPOSITIVOS			
	Costo (\$) al por mayor (sin impuestos)	Costo total (\$)	
Dispositivo			
Amplificador Operacional LM324 (2)	1.05	2.1	
Comparador LM339 (2)	1.05	2.1	
Terminales de bloques de 2 (12)	1.78	1.78	
Terminales de bloques de 3 (12)	1.78	1.78	
Pulsadores (10)	0.71	0.71	
Regulador positivo de 5V (2) LM7805	1	2	
Regulador negativo de 5V (2) LM7905	1	2	
Puente diodo rectificador (2)	1.07	2.14	
Resistores de 10 K Ω (24)	1.78	1.78	
Capacitores cerámicos de 33 pF (6)	0.71	0.71	
Osciladores de cristal de 4 MHz (4)	0.89	0.89	
Potenciómetros de 10 K Ω (12)	2.14	2.14	

Bases para circuito integrado de 28 pines (2)	0.71	0.71
Bases para circuito integrado de 14 pines (2)	0.71	0.71
Bases para circuito integrado de 8 pines (2)	0.71	0.71
Otros resistores	6.41	6.41
Diodos Leds	3.56	3.56
Otros capacitores electrolíticos y cerámicos	5.34	5.34
Total		37.57
OTROS COMPONENTES Y SUS COSTOS		
	Costo (\$) por unidad (sin impuestos)	Costo total (\$)
Dispositivo		
Tarjetas de circuito impreso (fibra de vidrio) (6)	2.14	12.84
Papel Fotográfico CLIP Premium (4"x6")	20	20
Botella de Ácido Nítrico	3.2	3.2
Total		36.04
	Costo Aproximado (Total)	139.11

Nota: El costo no incluye los gastos de transporte ni los impuestos.

VII CONCLUSIONES

Al desarrollar el presente trabajo basándose en los objetivos propuestos durante la fase inicial del proyecto, a continuación, se exponen un conjunto de conclusiones específicas que constituye los resultados de esta monografía.

Al estudiar las diferentes tipologías de sensores de corriente se concluyó que el sensor adecuado para llevar a cabo la medición de corriente debido a sus características y su bajo costo perteneces a la familia de sensores de Efecto Hall de lazo abierto, tal es el caso del ACS712. Esto debido a su característica de producir un voltaje de salida que es proporcional corriente que circula por el conductor. Cabe destacar que dicho sensor tiene un límite de medición para bajas corrientes, ya que en orden de mA no puede realizar una lectura precisa debido a su amplio rango de medición (hasta 17 A).

Se logró diseñar satisfactoriamente el prototipo medidor de energía haciendo uso del simulador de Labcenter Electronics ISIS Proteus y aunque no fue posible simular completamente el circuito debido a los errores de carga del software (expuestos anteriormente) cuando se conjuntan dispositivos analógicos y digitales, se sustituyeron los componentes por otros equivalentes que realizaban una operación similar y de esta manera se consiguió completar la simulación correspondiente.

El diseño del sistema de control mediante la familia de microcontroladores de la familia PIC de Microchip se logró implementar adecuadamente a través del código de programación usando el software PIC C Compiler.

Se desarrolló la interfaz de comunicación por medio del almacenamiento multimedia Card a través de la SD Card, la cual exhibe la información de las mediciones del proyecto en una hoja de cálculo de Excel.

La implementación del dispositivo medidor se logró llevar a cabo de manera conforme a un costo bajo y en un tiempo de desarrollo accesible.

Este trabajo monográfico permitió al autor desarrollar competencias en el diseño e implementación de proyectos con microcontroladores, así como nuevas habilidades y conocimientos de programación, simulación, electrónica de potencia y sistemas de control.

VIII RECOMENDACIONES

Para la continuidad y seguimiento de este trabajo se presentan las siguientes recomendaciones:

- Utilizar un sensor de corriente con capacidad para la medición de dispositivos con bajo consumo de corriente (menor a 800 mA).
- Emplear un dispositivo de medición de energía de la familia Analog Devices. Estos dispositivos realizan el monitoreo de energía mediante registros internos programables y se conjuntan con los microcontroladores mediante el bus de comunicaciones SPI, además cuentan con conversores analógicos sigma-delta, integradores digitales, circuitos de compensación de fase y un bloque de medición de energía por lo que mejoraría la precisión de la medición.
- Diseñar una interfaz gráfica con la ayuda de software GUI. Se podría utilizar LABVIEW, ya que contiene una amplia herramienta con diferentes paneles, diagramas y terminales en los que se mostrarían el comportamiento de la distintas señales, permitiría crear diagrama de bloque de los procesos y lo que visualizar los datos almacenados mediante tablas y hojas de cálculo.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. d. S. P. Centro Humboldt, Managua,, 2008, p. 11.
- [2] C. M. F. J.-. J. L. R. Albarracin, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MICROPROCESADO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS EN FORMA REMOTA DE UN MEDIDOR DIGITAL DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE TIPO INDUSTRIAL, MEDIANTE TELEFONÍA CELULAR, Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA NACIONAL, 2006.
- [3] O. Salinas y G. Perez, «Normtiva del Servicio Eléctrico,» Managua, 2001, p. 18.
- [4] J. A. E. G. Alvaréz, «Así Funciona,» [En línea]. Available: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_voltaje/ke_voltaje_1.htm. [Último acceso: Junio 2015].
- [5] «imergia,» [En línea]. Available: <http://www.imergia.es/eficiencia-energetica/que-es-la-potencia-reactiva>. [Último acceso: Junio 2015].
- [6] R. E. Galeazzi, «UNLUGAR.COM,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: http://ingenieria-reg.unlugar.com/UNNOBA_archivos/ccarp2.pdf. [Último acceso: Junio 2015].
- [7] «asifunciona,» [En línea]. Available: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_factor_potencia/ke_factor_potencia_4.htm. [Último acceso: Octubre 2015].

- [8] M. A. Renzetti, «Notas Sobre Electricidad,» e29, p. 10, 2008.
- [9] Anónimo, «Icarito,» Mayo 2012. [En línea]. Available: <http://www.icarito.cl/enciclopedia/articulo/segundo-ciclo-basico/ciencias-naturales/fuerza-y-movimiento/2009/12/61-7625-9-la-energia-electrica.shtml>. [Último acceso: Junio 2015].
- [10] B. Y. T. TOMA DE CORRIENTES MONOFÁSICA, «Proyecto Sistema de Tierras,» [En línea]. Available: <https://proyectosistematierra.wordpress.com/2012/11/28/toma-de-corrientes-monofasica-bifasica-y-trifasica/>. [Último acceso: Junio 2015].
- [11] G. E. H. Gonzáles, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA INTEGRADO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA MONOFÁSICA DE USO RESIDENCIAL,» BUCARAMANGA, UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA, 2008, p. 32.
- [12] «NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES DE CORRIENTE EN MEDIDORES DE ESTADO SOLIDO,» *Analog Devices*, pp. 1-3.
- [13] F. -. F. A. -. L. O. G. Marder, «Sensor lineal de corriente para medición de energía,» *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, p. 4, 2003.
- [14] L. Allegro MicroSystems, «ACS712,» de *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*, Massachusetts, Allegro MicroSystems, LLC, 2012, p. 15.
- [15] Paul Aguayo S., *Introducción al Microcontrolador*, 2004.

- [1] I. d. S. y. Automática, «El módulo LCD,» *Universités Miguel Hernández*.
6]
- [1] «DS1307 64 x 8 Serial Real-Time Clock,» *Dallas Semiconductor*, pp. 1-3.
7]
- [1] sdcard.org, 10 Diciembre 2015. [En línea]. Available: www.sdcard.org.
8]
- [1] C. C. Services, «CCS Inc.,» [En línea]. Available:
9] <http://www.ccsinfo.com/>. [ ltimo acceso: Junio 2015].
- [2] L. E. V. Overview, «Labcenter Electronics,» [En línea]. Available:
0] http://www.labcenter.com/products/vsm_overview.cfm. [ ltimo acceso:
Junio 2015].
- [2] F. X. S. Rubí, «SISTEMA SCADA DE BAJO COSTO BASADO EN
1] MICROCONTROLADORES Y REDES INALÁMBRICAS PARA EL
CONTROL REMOTO DE RESPALDO ELÉCTRICO,» Managua,
Universidad Nacional de Ingenier , 2011, p. 25.
- [2] Suky, «ucontrol,» 2011. [En línea]. Available:
2] [http://www.ucontrol.com.ar/forosmf/programacion-en-c/sd-card-
libreria-fat16-libreria-a-nivel-hardware-\(ccs-c18-c30-ect-\)/?wap2](http://www.ucontrol.com.ar/forosmf/programacion-en-c/sd-card-libreria-fat16-libreria-a-nivel-hardware-(ccs-c18-c30-ect-)/?wap2).
[ ltimo acceso: Diciembre 2015].
- [2] F. A. A. NAVAS y DANIEL ANTONIO CORTEZ FRANCO, «Diseño e
3] Implementación de un Medidor Trifásico,,» San Salvador, UNIVERSIDAD
DE EL SALVADOR, 2005, p. 24.

- [2 D. D. North, «Honeywell,» Junio 2010. [En línea]. Available:
4] http://sensing.honeywell.com/csrx25_product-sheet_100452-4-en.pdf.
[Último acceso: 7 Diciembre 2013].
- [2 A. N. d. I. R. d. Nicaragua., «LEY DE VARIACIÓN DE LA TARIFA DE
5] ENERGÍA ELÉCTRICA AL CONSUMIDOR,» de *Normas Jurídicas de Nicaragua*, Managua, 2015.

X ANEXOS

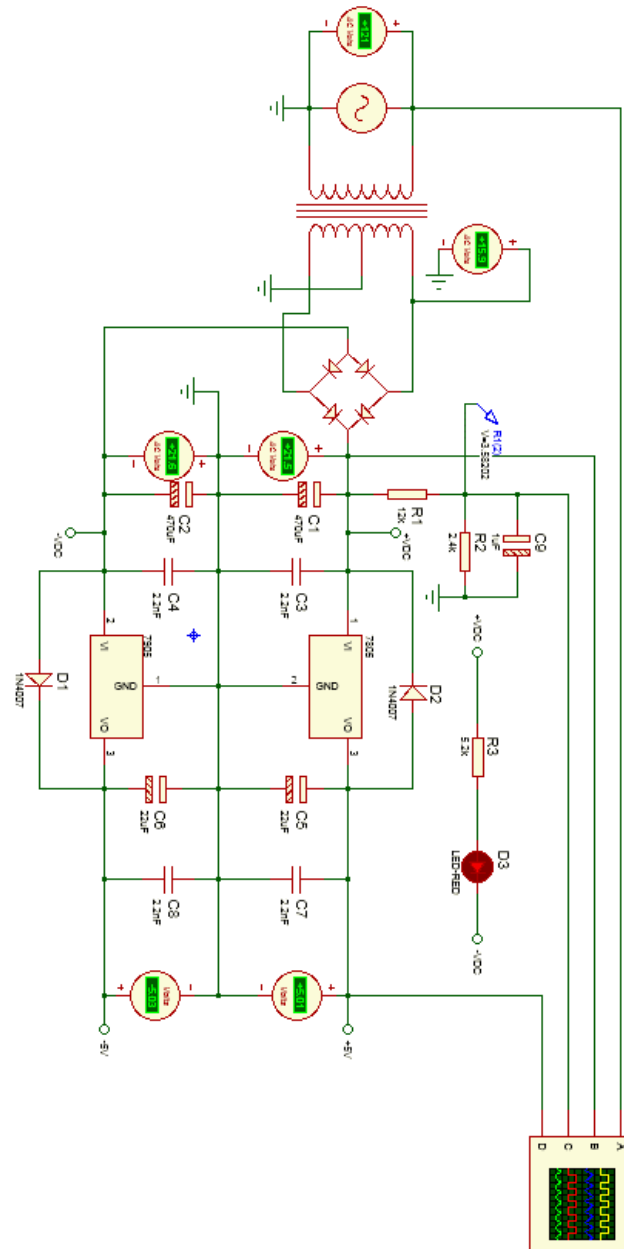
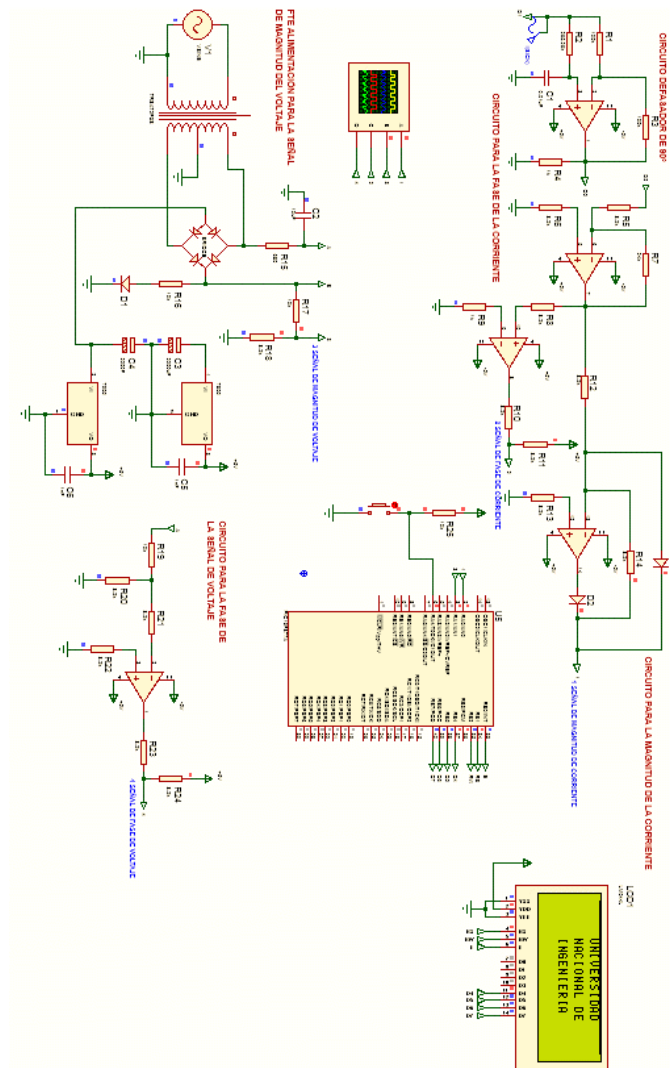


Figura 60: Circuito completo de la fuente de voltaje



- ⚠ Simulation is not running in real time due to excessive CPU load.
- ⚠ [SPICE] singular matrix: check nodes [u1:a:15](#) and [u1:b:15](#).
- ⚠ [SPICE] singular matrix: check nodes [u1:a:15](#) and [u1:b:15](#).
- ⚠ [SPICE] DELMIN increased to 8.88178e-016 due to lack of time precision
- ⚠ [SPICE] singular matrix: check nodes [u1:d:15](#) and [u1:d:49](#).
- ⚠ [SPICE] transient GMIN stepping at time=4.78855
- ⚠ [SPICE] TRAN: Timestep too small; timestep = 1.11022e-016: trouble with node [#00001](#).

Figura 61: Errores de la simulación con muchos componentes analógicos

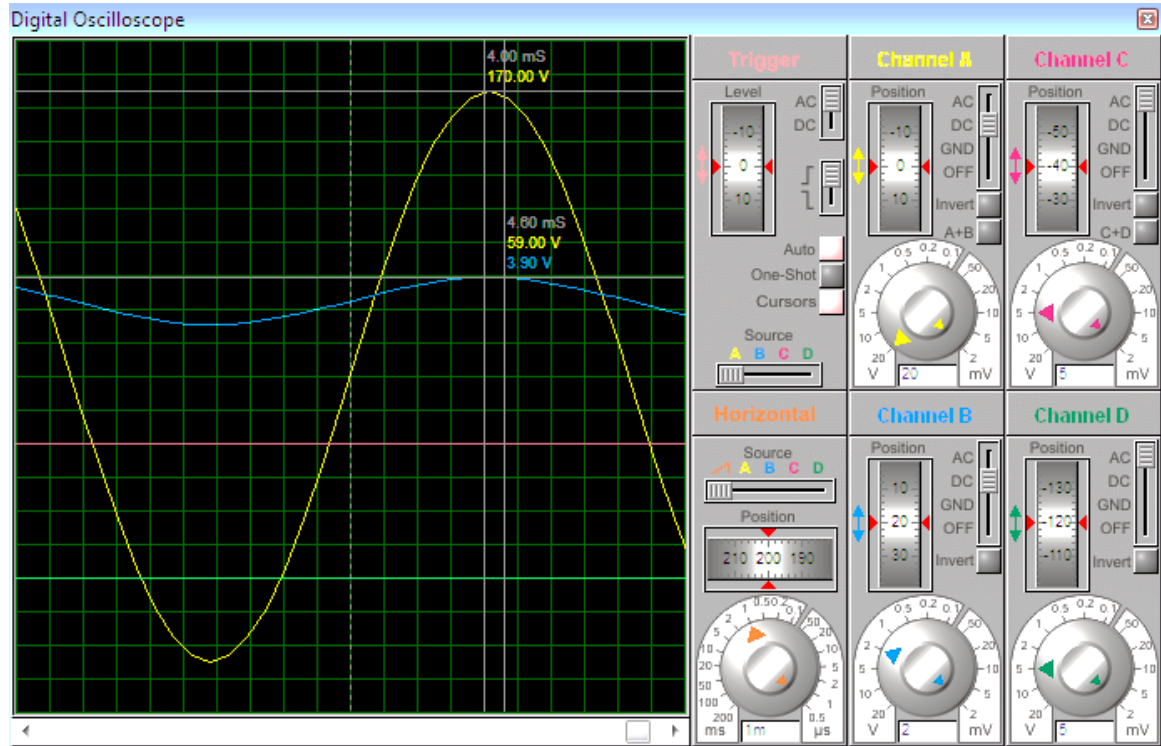


Figura 62: Señales del osciloscopio. Canal A y canal B

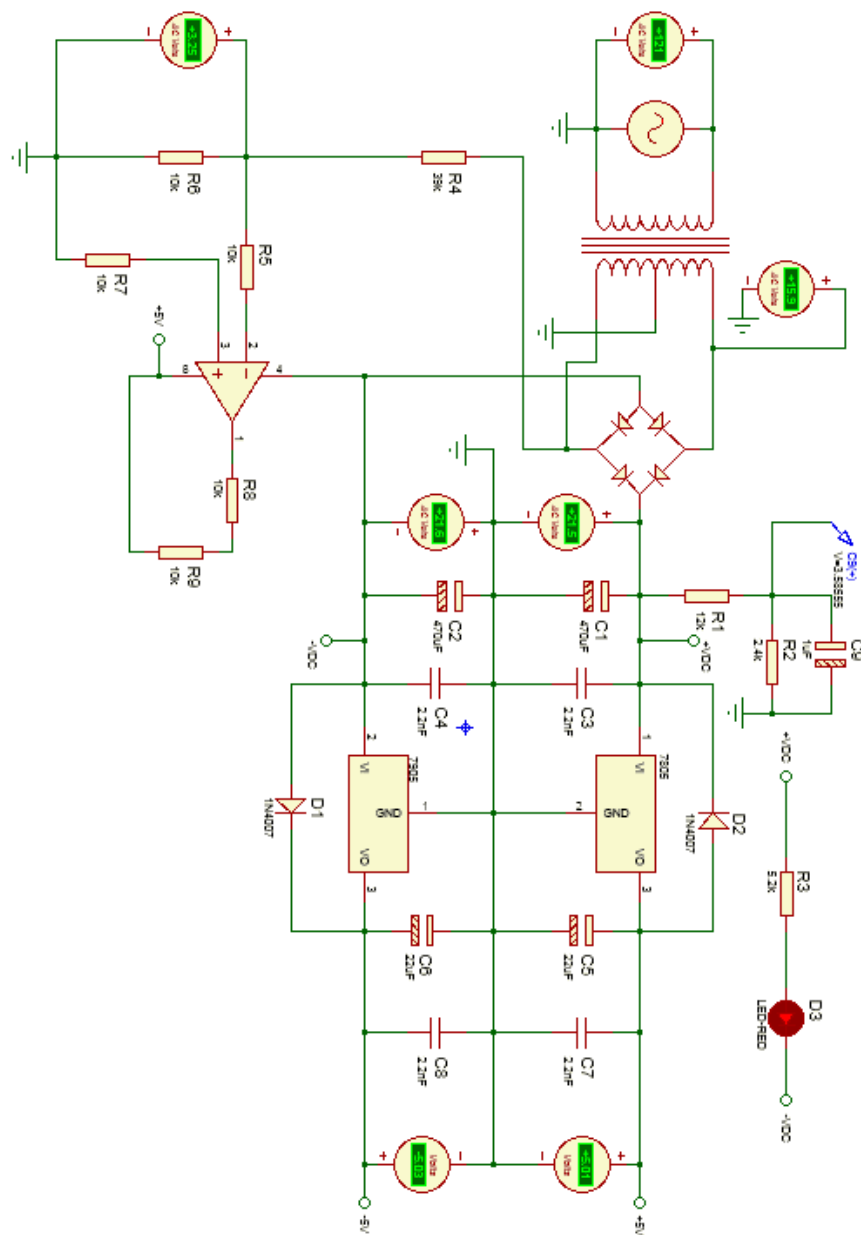


Figura 63: Circuito de fase de la señal de voltaje

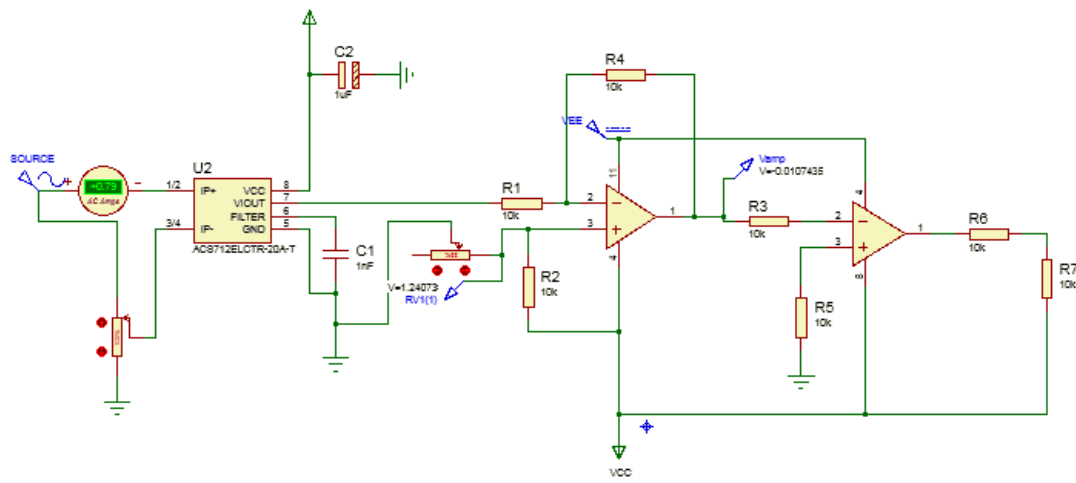


Figura 64: Circuito de fase de la señal de corriente

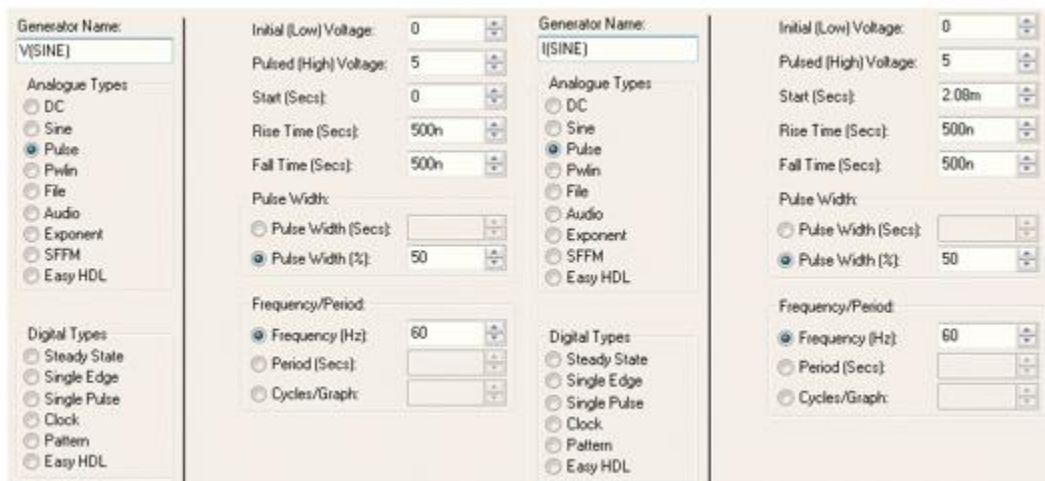


Figura 65: Configuración de los propiedades de los generadores de pulso para las fases de las señales de corriente y voltaje

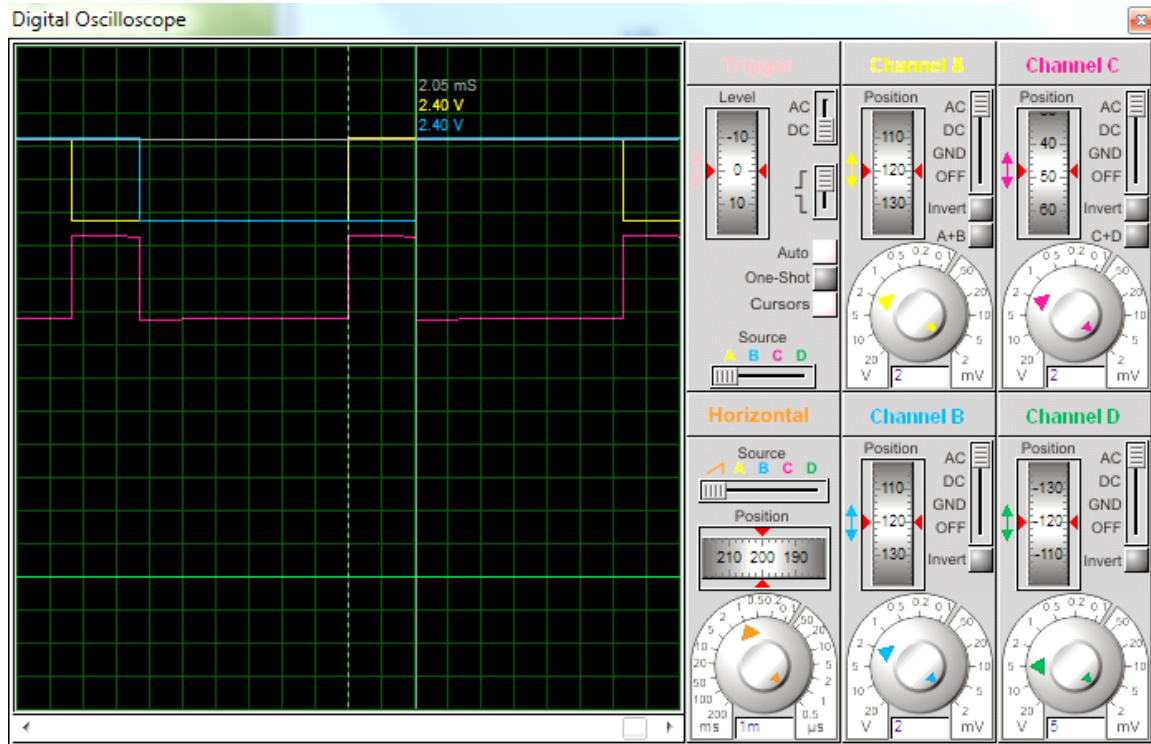


Figura 66: Ancho de pulso de las señal resultante entre la diferencia de fase de V e I

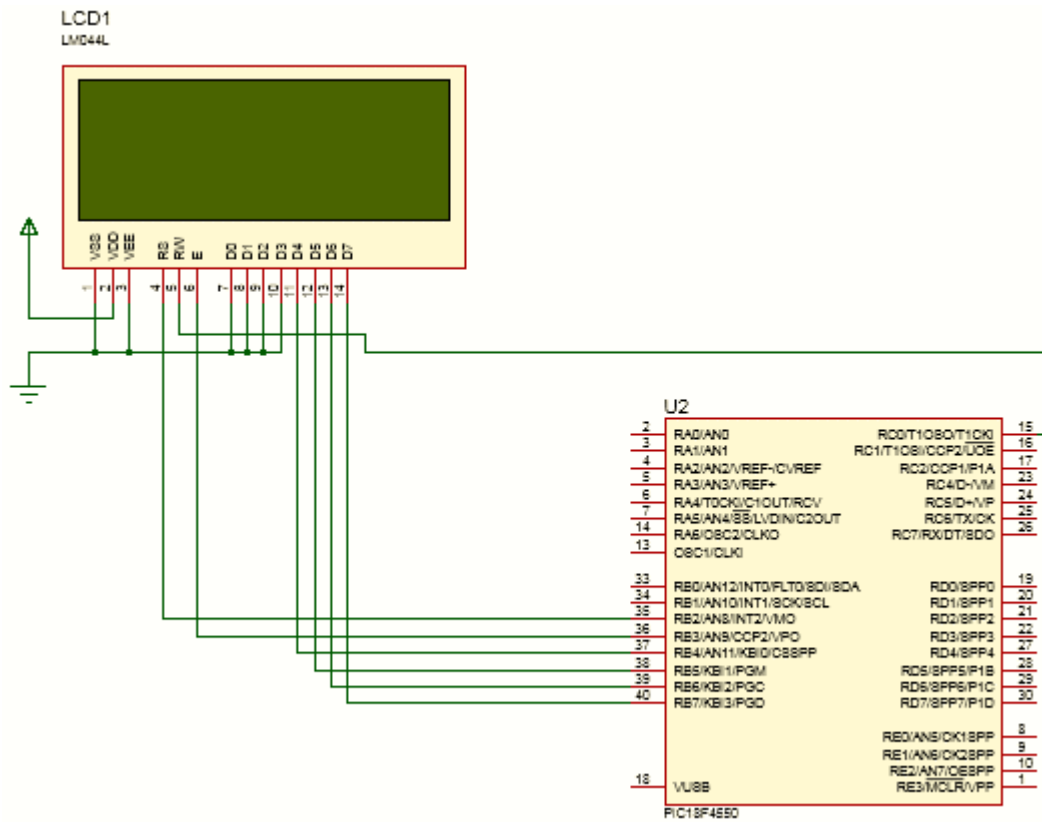


Figura 67: Conexión del LCD LM044L

```
int8 cont_set;

//Variables para configuracion de tiempo
int8 set_hora, set_minuto, set_segundo;
int8 set_dia, set_mes, set_ano;
int8 setdia_semana;

void set_time()
{
    printf(lcd_putc, "\f");
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc, "Config. Tiempo");

    set_hora=0;
    set_minuto=0;
    set_segundo=0;
    set_dia=0;
    set_mes=0;
    set_ano=0;
    setdia_semana=0;

    while(cont_set==1)
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc, "Hora: %02u      ", set_hora);
        if((input(PIN_A3))&&(set_hora<24))
        {
            set_hora++;
            if(set_hora==24)
            {
                set_hora=0;
            }
            delay_ms(300);
        }
        else
        {
            if((input(PIN_A4))&&(set_hora<24))
            {
                set_hora--;
                if(set_hora==0)
                {
                    set_hora=23;
                }
                delay_ms(300);
            }
        }
    }
}
```

```
while(cont_set==2)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Minuto: %02u    ",set_minuto);
    if((input(PIN_A3))&&(set_minuto<60))
    {
        set_minuto++;
        if(set_minuto==60)
        {
            set_minuto=0;
        }
        delay_ms(300);
    }
    else
    {
        if((input(PIN_A4))&&(set_minuto<60))
        {
            set_minuto--;
            if(set_minuto==0)
            {
                set_minuto=59;
            }
            delay_ms(300);
        }
    }
}

while(cont_set==3)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Segundo: %02u    ",set_segundo);
    if((input(PIN_A3))&&(set_segundo<60))
    {
        set_segundo--;
        if(set_segundo==60)
        {
            set_segundo=0;
        }
        delay_ms(300);
    }
    else
    {
        if((input(PIN_A4))&&(set_segundo<60))
        {
            set_segundo--;
            if(set_segundo==0)
            {
                set_segundo=59;
            }
            delay_ms(300);
        }
    }
}
```

```
while(cont_set==4)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Dia: %02u      ",set_dia);
    if((input(PIN_A3))&&(set_dia<32))
    {
        set_dia++;
        if(set_dia==32)
        {
            set_dia=0;
        }
        delay_ms(300);
    }
    else
    {
        if((input(PIN_A4))&&(set_dia<32))
        {
            set_dia--;
            if(set_dia==0)
            {
                set_dia=31;
            }
            delay_ms(300);
        }
    }
}

while(cont_set==5)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Mes: %02u      ",set_mes);
    if((input(PIN_A3))&&(set_mes<13))
    {
        set_mes++;

        if(set_mes==13)
        {
            set_mes=0;
        }
        delay_ms(300);
    }
    else
    {
        if((input(PIN_A4))&&(set_mes<13))
        {
            set_mes--;
            if(set_mes==0)
            {
                set_mes=12;
            }
            delay_ms(300);
        }
    }
}
```



```
while(cont_set==6)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"Año: 20%02u    ",set_ano);
    if((input(PIN_A3))&&(set_ano<50))
    {
        set_ano++;
        if(set_ano==50)
        {
            set_ano=0;
        }
        delay_ms(300);
    }
    else
    {
        if((input(PIN_A4))&&(set_ano<50))
        {
            set_ano--;
            if(set_ano==0)
            {
                set_ano=49;
            }
            delay_ms(300);
        }
    }
}
```

Figura 68: Librería para la configuración de la fecha y el tiempo del DS1307

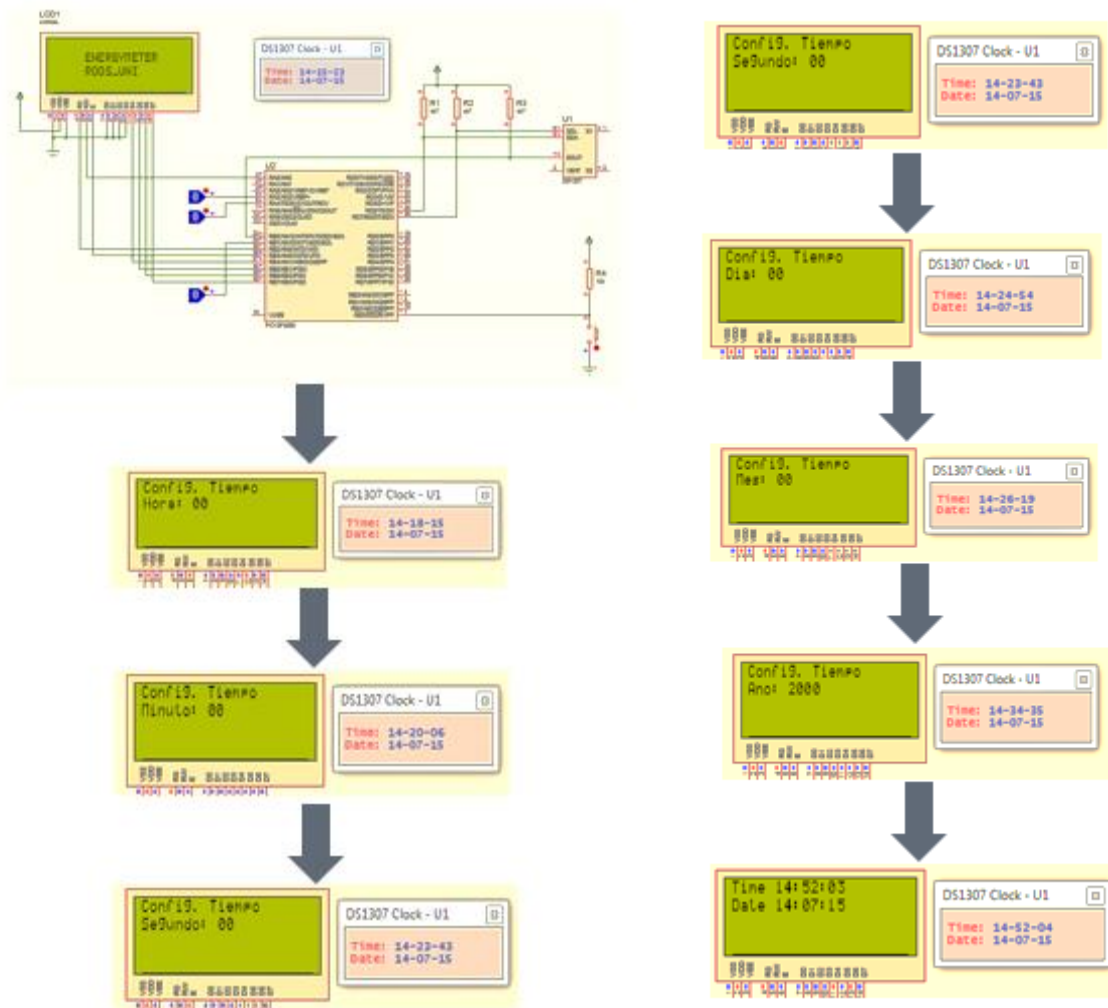


Figura 69: Diagrama paso a paso de la configuración de fecha y tiempo del DS1307

```
//Detecta si la SD card fue ingresada
if(SD_DETEC==0)
{
    //Inicia la SD card
    SDCard_init();
    FAT_init();

    //Obtiene el tiempo actual del DS1307
    ds1307_get_time(get_hora,get_minuto,get_segundo);
    ds1307_get_date(get_dia,get_mes,get_ano,dia_semana);

    //Actualiza fecha para el registro en la SD card
    FAT_UpdateDateTime(get_dia,get_mes,get_ano,get_hora,get_minuto,get_segundo);

    //Busca carpeta dentro de la SD card
    strcpy(&NombreCorto[0],"CARPET~1");

    //Retorna 1 si encuentra la carpeta, 0 en caso contrario
    if(FAT_FindFileDir(&NombreCorto[0],DirectorioRaiz,Directorio,&SectFound,&FAddDir,&Fnclus,&FSizeFile)==1)
    {
        //Carpeta encontrada
        //Busca el archivo correspondiente

        //Guarda la ubicacion del registro padre en la ubicacion del folder para indicar la direccion
        UbicacionFolder=Fnclus;
        sprintf(SFN,"FILE%02u%02u.CSV",get_dia,get_mes);
        strcpy(&NombreCorto1[0],SFN);

        //Retorna 1 si encuentra el archivo, 0 en caso contrario
        if(FAT_FindFile(&NombreCorto1[0],UbicacionFolder)==1)
        {
            //Retorna 1 si encuentra la carpeta, 0 en caso contrario
            if(FAT_FindFileDir(&NombreCorto[0],DirectorioRaiz,Directorio,&SectFound,&FAddDir,&Fnclus,&FSizeFile)==1)
            {
                //Carpeta encontrada
                //Busca el archivo correspondiente

                //Guarda la ubicacion del registro padre en la ubicacion del folder para indicar la direccion
                UbicacionFolder=Fnclus;
                sprintf(SFN,"FILE%02u%02u.CSV",get_dia,get_mes);
                strcpy(&NombreCorto1[0],SFN);

                //Retorna 1 si encuentra el archivo, 0 en caso contrario
                if(FAT_FindFile(&NombreCorto1[0],UbicacionFolder)==1)
                {
                    //Archivo existe, entonces se agregan datos
                    //Adquiere el dato del convertidor ADC
                    voltage();
                    current_i();

                    //Obtiene el tiempo actual del DS1307
                    ds1307_get_time(get_hora,get_minuto,get_segundo);
                    ds1307_get_date(get_dia,get_mes,get_ano,dia_semana);

                    //Forma el string que se agrega al archivo
                    sprintf(Texto2,"%02u/%02u/%02u,%02u:%02u:%02u,%3.2f,%3.2f\r\n",get_dia,get_mes,get_ano,get_hora,get_minuto,get_segundo,q,curr);

                    //Agrega la informacion al archivo
                    FAT_OpenAddFile(&NombreCorto1[0],UbicacionFolder,&Texto2[0]);
                }
            }
        }
    }
}
```

```

    }
    else
    {
        //No existe el archivo, entonces se crea
        //Crea un archivo llamado mediciones con su respectiva fecha
        sprintf(SFN, "Volt-%02u-%02u-%02u.csv", get_dia, get_mes, get_ano);
        strcpy(&NombreLargo1[0], SFN);
        FAT_CreateFile(&NombreLargo1[0], &NombreCorto1[0], UbicacionFolder, &Texto[0]);
    }
}
else
{
    //No existe carpeta, entonces se crea y se crea archivo
    //Crea la carpeta
    strcpy(&NombreCorto[0], "CARPET~1"); //ID
    strcpy(&NombreLargo[0], "ENERGYMETER"); //Nombre de carpeta
    UbicacionFolder = FAT_CreateDirectory(&NombreLargo[0], &NombreCorto[0], DirectorioRaiz);

    //Crea un archivo llamado mediciones con su respectiva fecha
    sprintf(SFN, "FILE%02u%02u.CSV", get_dia, get_mes); //ID
    strcpy(&NombreCorto1[0], SFN);
    sprintf(SFN, "Volt-%02u-%02u-%02u.csv", get_dia, get_mes, get_ano); //Nombre del archivo
    strcpy(&NombreLargo1[0], SFN);
    FAT_CreateFile(&NombreLargo1[0], &NombreCorto1[0], UbicacionFolder, &Texto[0]);
}
}
}

```

Figura 70: Código de programación de la tarjeta de memoria

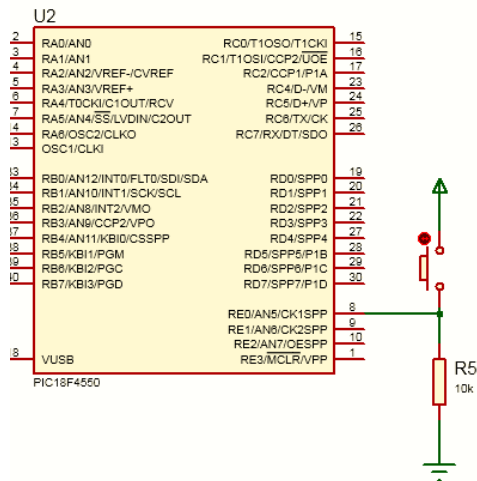
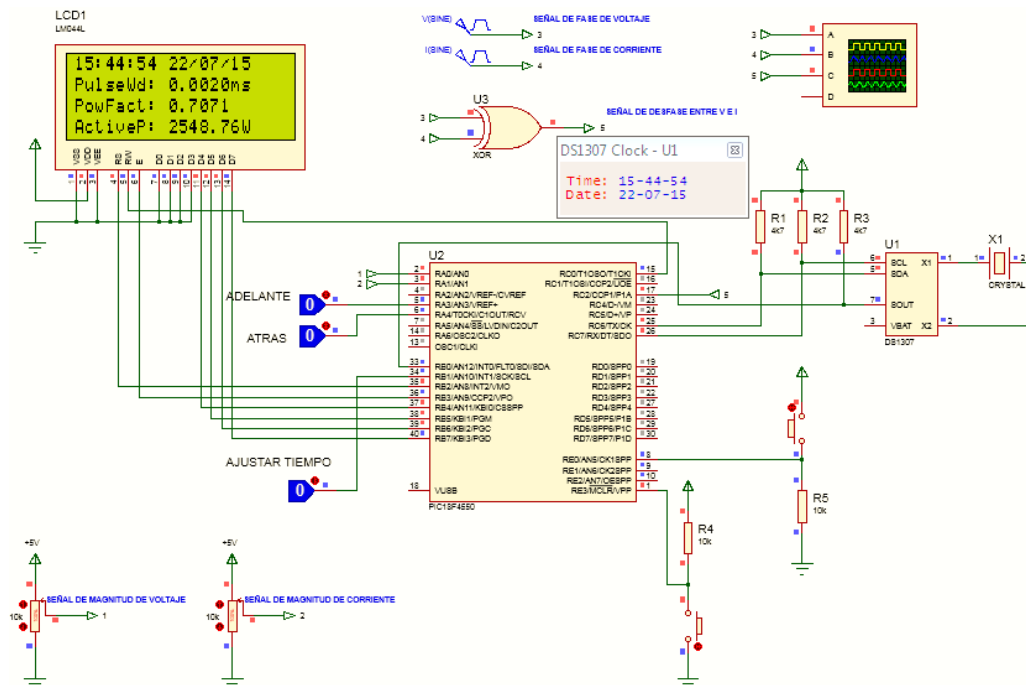
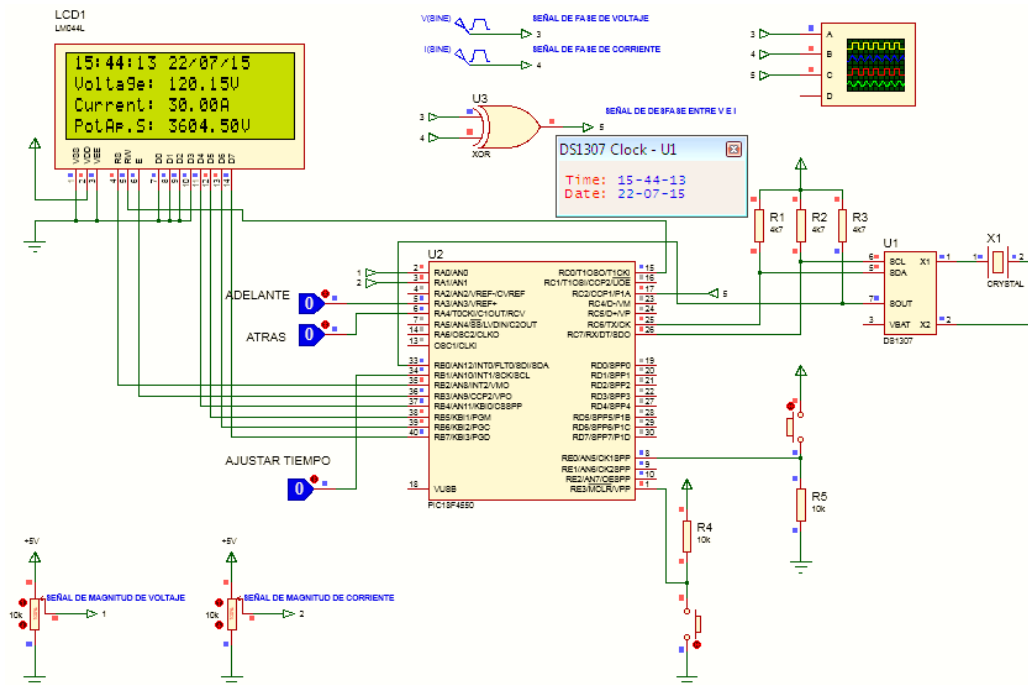


Figura 71: Push Button de incremento de hora para energía activa



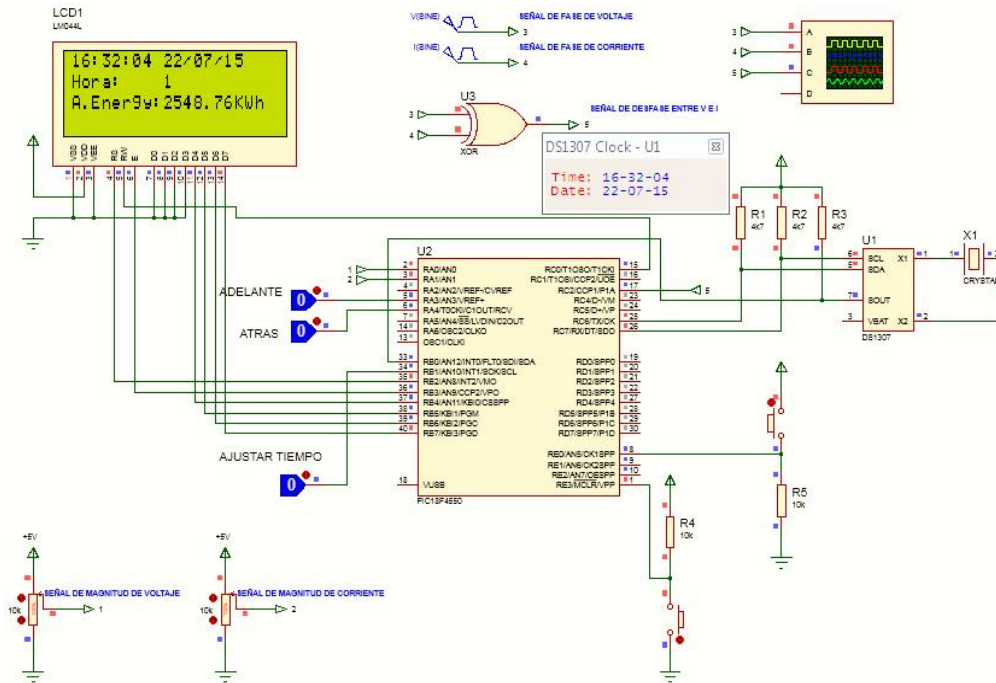


Figura 72: Interfaz del diseño del prototipo medidor de energía

10.1 DISEÑO DE LAS TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO

10.1.1 TARJETA DE LA FUENTE DE PODER Y EL CIRCUITO DE LA SEÑAL DE MAGNITUD DE Tensión

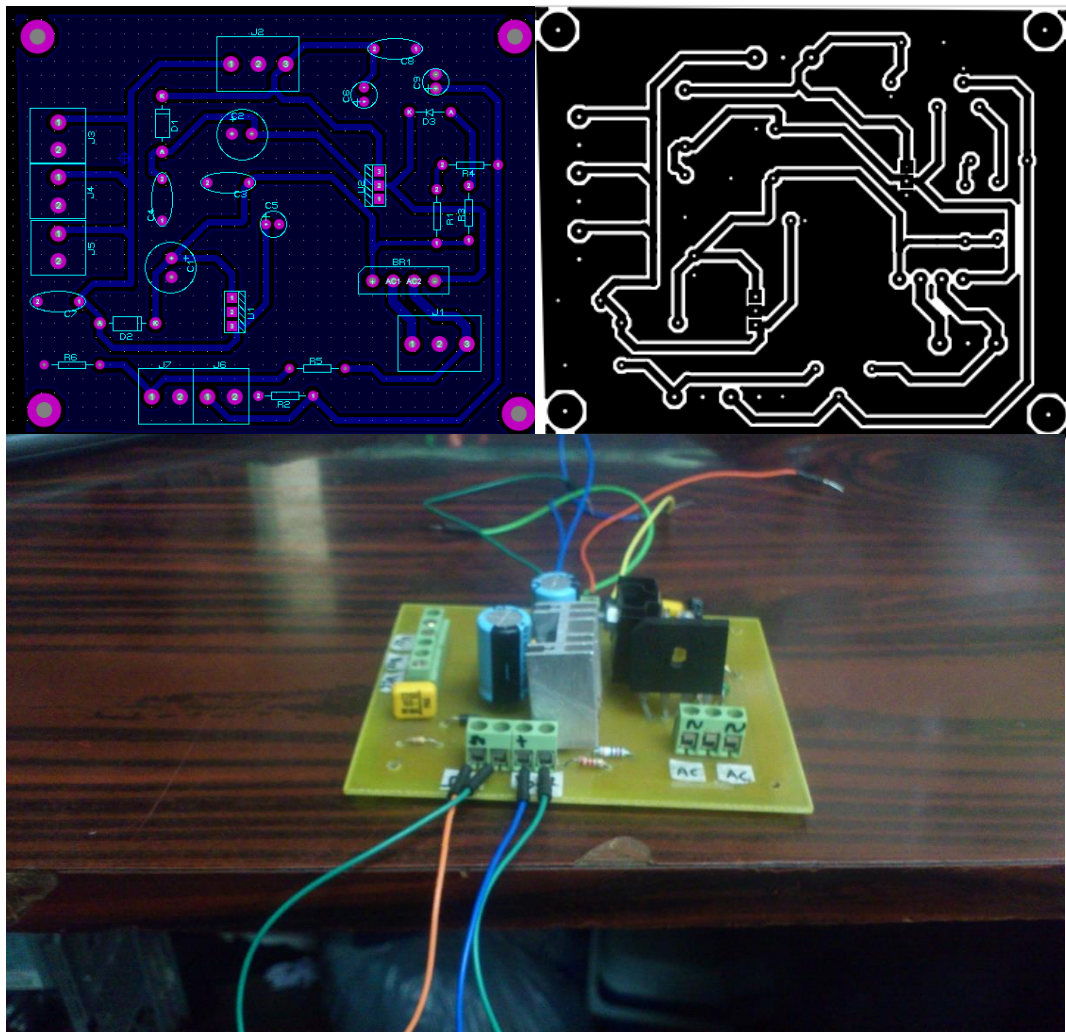


Figura 73: Diseño de la Fuente de Voltaje y el Circuito de Magnitud de Tensión

10.1.2 TARJETA DEL SENSOR DE CORRIENTE Y LA SEÑAL DE MAGNITUD DE CORRIENTE

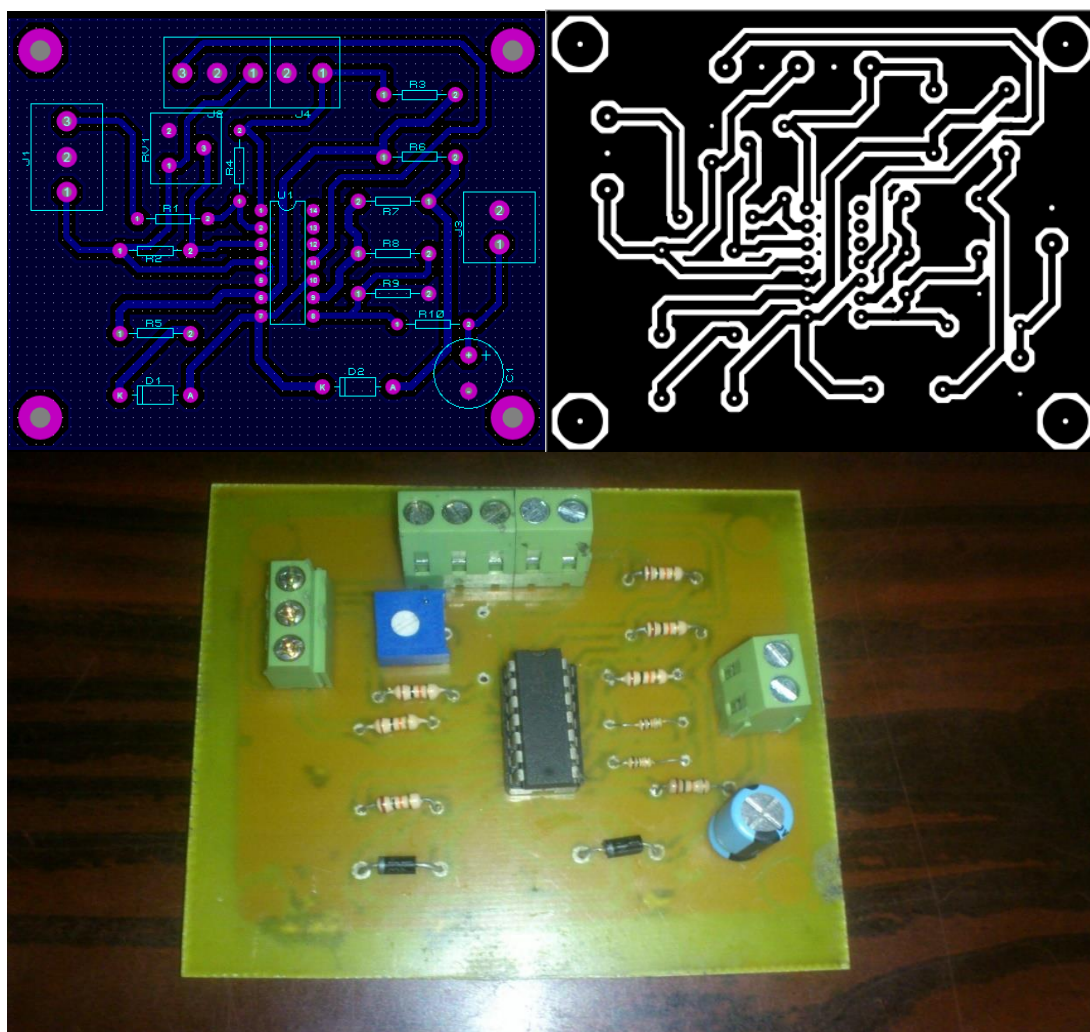


Figura 74: Diseño de la tarjeta del sensor de corriente y la señal de magnitud de corriente

10.1.3 TARJETA DE LAS SEÑALES DE FASE DE Tensión Y CORRIENTE

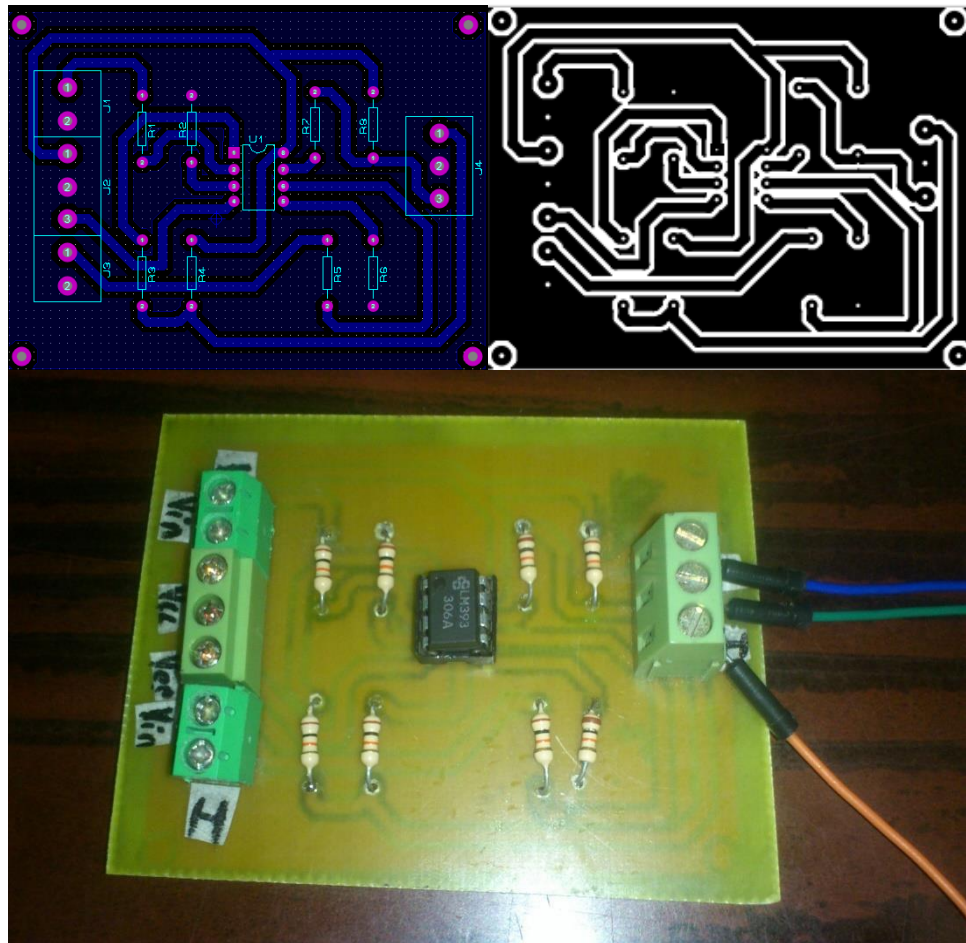


Figura 75: Tarjeta para las señales de fase de Voltaje y Corriente